



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Entwicklung eines Leitfades zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland

Priester, Marvin
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00011894>

Lizenz:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Namensnennung

Publikationstyp: Bachelorarbeit

Fachbereich: 13 Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11894>

Entwicklung eines Leitfadens zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland

Bachelor-Thesis: Marvin Priester, MatrNr. 2915685

Juni 2020



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Bachelor-Thesis von Marvin Priester

Thema: "Entwicklung eines Leitfadens zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland"

Subject: "Guideline development for the estimation of the profitability of a pico hydro power plant in a developing country"

Betreuer: Prof. Dr-Ing. habil. Boris Lehmann

Studiengang Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Fachbereich 13 - Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Institut Wasserbau und Wasserwirtschaft

Franziska-Braun Straße 7

64287 Darmstadt

Bearbeitungszeitraum: 18.02.2020 – 16.06.2020

Datum der Einreichung: 02.06.2020

Darmstadt, 02.06.2020



Bachelor-Arbeit für Herr Marvin PRIESTER (Matr.-Nr. 2915685)

Entwicklung eines Leitfadens zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland

— **Guideline development for the estimation of the profitability of a pico hydro power plant in a developing country.**

Veranlassung und Thema

— Die Nutzung der Wasserkraft als regenerative Energie ist bereits heute eine wichtige Säule in der nationalen und internationalen Energiewirtschaft. Bis dato wird überwiegend die Energie von Fließgewässern in sog. Laufwasserkraftwerken oder Speicherkraftwerken genutzt, wobei eine Querverbauung des Gewässers notwendig ist. Eine andere Möglichkeit besteht im Einsatz hydrokinetischer Energiewandler in Form von Turbinen, welche frei in der Strömung des Gewässers positioniert werden. Aufgrund ihrer vielfach belegten geringeren Effizienz, kommen sie allerdings nicht flächendeckend zum Einsatz. Durch die im Vergleich zu Kraftwerken mit Querverbauung relativ geringen Kosten, könnten hydrokinetische Turbinen allerdings einen sinnvollen Beitrag zur dezentralen Energieversorgung in strukturschwachen Regionen bieten, da hier keine großen Energiemengen benötigt werden. Ein Forschungsprojekt an der TU-Darmstadt beschäftigt sich deshalb mit der Ausentwicklung eines kostengünstigen, robusten und mobilen hydrokinetischen Energiewandlers für den Einsatz in Schwellen- und Entwicklungsländern.

Aufgabenstellung

— Im Rahmen der Bachelorarbeit soll Herr Priester einen Leitfaden entwickeln, anhand dessen Investoren die Wirtschaftlichkeit des Betriebs eines Kleinstwasserkraftwandlers in einem Entwicklungsland abschätzen können. Dazu sind die folgenden Leistungen zu erbringen:

- Recherche und Dokumentation existierender Typen von Kleinstwasserkraftwandlern sowie Darstellung der Einsatzgebiete, Vorteile und Nachteile. Die gesammelten Ergebnisse sollen anschließend noch einmal komprimiert in einer Tabelle zusammengefasst werden.

- Erarbeitung und Dokumentation wesentlicher (hydrologischer, technischer, wirtschaftlicher, geographischer, politischer, ...) Einflussparameter, welche für den erfolgreichen Einsatz eines Kleinstwasserkraftwandlers maßgeblich sind.
- Erarbeitung einer Checkliste, anhand derer ein Investor die Wirtschaftlichkeit einer Anlage an einem gegebenen Standort grob abschätzen kann.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten.

Der/die Kandidat/in hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden. Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Hydromechanik - Gerinnehydraulik
Ansprechpartner	M. Sc. Robin Ruff FG Wasserbau und Hydraulik r.ruff@wb.tu-darmstadt.de		
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 17 Wochen	Arbeitsbedingungen	Heimarbeit

Darmstadt, den 21.01.2020



Prof. Boris Lehmann

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Kurzfassung	V
Abstract	V
1.....Problemstellung	1
2.....Grundlagen der Kleinstwasserkraft	3
2.1. Bedeutung der Wasserkraft als Energiequelle	3
2.2. Leistung einer Wasserkraftanlage	4
2.3. Besonderheiten der Kleinstwasserkraft	5
2.3.1. Allgemeine Aspekte der Kleinstwasserkraft	5
2.3.2. Ökonomische, ökologische und soziale Aspekte der Kleinstwasserkraft	7
2.3.3. Kleinstwasserkraftanlagen in Schwellen- und Entwicklungsländern	9
2.3.4. Zusammenfassung	9
3.....Darstellung der gängigsten Kleinstwasserkraftturbinen	10
3.1. Gleichdruck-/Impulsturbinen	10
3.1.1. Pelton-Turbine	10
3.1.2. Turgo-Turbine	11
3.1.3. Durchströmturbine	11
3.2. Überdruck-/Reaktionsturbine	12
3.2.1. Kaplan-/Propellerturbine	12
3.2.2. Francis-Turbine	12
3.2.3. Pump as Turbine (PAT)	13
3.2.4. Tesla-Turbine	14
3.3. Zusammenfassung	15
4.....Gängige Kleinstwasserkraftsysteme	17
4.1. Peltric Set	17
4.2. Low-cost DC Pico Hydro System	17
4.3. Pico Power Pack (PPP)	18
4.4. Motor Dynamo Based Family Hydro (MDFH)	18
4.5. PowerPal	18
5.....Faktoren für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage	19
5.1. Hydrologische Faktoren	19
5.2. Technische Faktoren	20
5.2.1. Bedeutung der Auswahl des Turbinentyps	20
5.2.2. Bedeutung der Auswahl des Generators	22

5.2.3.	Technische Wartung, Haltung und Reparatur	23
5.2.4.	Bedeutung des Kabelsystems	24
5.2.5.	Manufaktur der Kleinstwasserkraftturbine	27
5.3.	Geografie und Topografie	28
5.4.	Wirtschaftliche Faktoren	28
5.4.1.	Kapital- und laufende Kosten	29
5.4.2.	Zusätzlich angebrachte Lasten	30
5.4.3.	Aktuelle Marktsituation	31
5.5.	Politische Faktoren	31
5.5.1.	Regierungsmaßnahmen	32
5.5.2.	Politische Risiken	33
5.6.	Partizipation der Kommune	34
6.....	Checkliste für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland	35
7.....	Zukunftsausblick der Kleinstwasserkraft	37
8.....	Fazit	38
9.....	Literaturverzeichnis	39
10....	Anhang	42
	Eidesstattliche Erklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema einer Kleinstwasserkraftanlage	6
Abbildung 2-2: Kleinstwasserkraftanlage mit vertikal ausgerichteter Welle	5
Abbildung 2-3: Stromgestehungskosten für netzunabhängige Stromversorgung verschiedener Energieträger ...	7
Abbildung 3-1: In Sri Lanka lokal hergestellte Pelton-Turbine	10
Abbildung 3-2: Turgo-Turbine	11
Abbildung 3-3: Durchströmturbine	11
Abbildung 3-4: Kaplan-Turbine.....	12
Abbildung 3-5: Francis-Turbine	12
Abbildung 3-6: Pump as Turbine	13
Abbildung 3-7: Tesla-Turbine	14
Abbildung 5-1: Exemplarische Abflussdauerlinie mit Ganglinie eines Jahres	20
Abbildung 5-2: Wirkungsgrade von Turbinen nach Beaufschlagung	21
Abbildung 5-3: Generatoren für Kleinstwasserkraft	23
Abbildung 5-4: Gemittelte Investmentkosten für verschiedene Turbinen und Kabellängen	25
Abbildung 5-5: Gemittelte jährliche Kosten aufgeteilt nach Art für verschiedene Turbinentypen	26
Abbildung 5-6: Laufende Kosten von Kleinstwasserkraftanlagen in Laos	29
Abbildung 5-7: Kostenstruktur für verschiedene Formen von Kleinstwasserkraftanlagen	31
Abbildung 10-1: Tabelle zur Turbinenwahl basierend auf Fallhöhe und Durchfluss	42
Abbildung 10-2: Stromgestehungskosten für netzunabhängige Energieträger	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Klassifizierung von Wasserkraftanlagen nach installierter Leistung	3
Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile von Kleinstwasserkraftanlagen	9
Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Gleichdruckturbinen mit Vor- und Nachteilen.....	15
Tabelle 3-2: Zusammenfassung der Überdruckturbinen mit Vor- und Nachteilen.....	16
Tabelle 5-1: Subventionen von Kleinstwasserkraft in Nepal	32

Kurzfassung

Kleinstwasserkraft stellt eine valide Option zur Elektrifizierung ruraler Gebiete in Schwellen- und Entwicklungsländern mit erneuerbarer Energie da. Kleinstwasserkraftanlagen haben den Vorteil, bereits bei sehr geringen Fallhöhen und Durchflüssen arbeiten zu können, ökologisch verträglich zu sein und eine hohe soziale Akzeptanz aufzuweisen. Ein Nachteil liegt jedoch in den hohen Kapitalkosten der Anlagen, die von den meisten Kommunen in Entwicklungsländern nicht alleine getragen werden können und die deshalb auf die Hilfe eines Investors angewiesen sind. Investoren besitzen jedoch meist nicht die nötige technische Expertise, um die Eignung einer Kleinstwasserkraftanlage an einem gegebenen Standort abschätzen zu können.

Diese Arbeit stellt einen Leitfaden für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland dar. Es existiert eine Vielzahl von Turbinen für die Kleinstwasserkraft und sie stellen den Kern jeder Anlage dar. Es wird ein Überblick über gängige Kleinstwasserkraftturbinen gegeben. Zusätzlich werden bestehende Kleinstwasserkraftsysteme beschrieben. Die wesentlichen Einflussparameter (hydrologisch, technisch, wirtschaftlich...), welche für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage notwendig sind, werden aufgelistet und erläutert. Anschließend sorgt eine Checkliste dafür, dass ein Investor die Wirtschaftlichkeit einer Anlage an einem gegebenen Standort grob abschätzen kann.

Abstract

Pico hydropower is a valid option for the electrification with renewable energy of rural areas in emerging and developing countries. Pico hydropower plants have the advantage of being able to work with very low head and flow rates, being ecologically compatible and having a high level of social acceptance. One disadvantage, however, lies in the high capital costs of the plants, which most municipalities in developing countries cannot support on their own, and which therefore rely on the help of an investor. However, investors usually do not have the necessary technical expertise to estimate the suitability of a pico hydropower plant at a given location.

This work provides a guideline for the estimation of the economic efficiency of a pico hydropower plant in a developing country. There are many turbines for the pico hydropower plant and they represent the core of each plant. An overview of common pico hydropower turbines is given. Existing pico hydropower systems are also described. The main influencing parameters (hydrological, technical, economical...), which are necessary for the successful utilization of a pico hydropower plant are listed and explained. A checklist then ensures that an investor can roughly estimate the economic viability of a plant at a certain location.

1. Problemstellung

Derzeit leben weltweit 10% aller Menschen ohne Elektrizität, in ruralen Gebieten liegt dieser Wert sogar bei mehr als 17% (The World Bank Group, 2018). Der Großteil dieser Menschen lebt in Schwellen- und Entwicklungsländern im subsaharischen Afrika oder Süd- und Südostasien und ist zum Kochen und Heizen immer noch auf Holz, Holzkohle oder tierische Abfälle angewiesen. Die United Nations (UN) haben 2016 in den Zielen für nachhaltige Entwicklung politische Richtlinien festgelegt, welche unter anderem beinhalten, nachhaltige und moderne Energie für alle Menschen zugänglich zu machen. Dabei wurde für 2030 das Ziel angesetzt, bezahlbare, zuverlässige und moderne Energie für alle Menschen bereitzustellen und den Anteil an erneuerbaren Energien wesentlich zu erhöhen (United Nations, 2016).

In ruralen Gebieten in Schwellen- und Entwicklungsländern erweist sich ein Anschluss an den nationalen Netzbetrieb jedoch oft als technisch kompliziert und ist mit hohen Kosten verbunden. Um die Ziele der UN auch für diese Menschen zu verwirklichen, wird ein Ausbau von netzunabhängigen, regenerativen Energieträgern notwendig sein. Autarke, regenerative Energiesysteme bieten die Möglichkeit, in diesen Gebieten eine umweltfreundliche und kostengünstige Stromversorgung bereitzustellen.

Weltweit stellt Wasserkraft mit gut 2/3 den größten Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dar (REN21, 2017, p. 33). Der Großteil hiervon wird von großen Wasserkraftwerken mit Leistungen im Mega- oder Gigawatt-Bereich produziert. Große Wasserkraftanlagen gehen mit starken ökologischen und sozialen Folgen einher und finden in der Bevölkerung nur selten Akzeptanz. Oft sind diese mit Umsiedlungen von Anwohnern verbunden und der aquatische Lebensraum wird durch die Stauung und Speicherung des Wassers in Dämmen bzw. Reservoirs massiv beeinflusst. Diese Anlagen sind keine Option für eine netzunabhängige Versorgung mit erneuerbarer Energie in ruralen Gebieten von Schwellen- und Entwicklungsländern. Daher stellt sich die Frage, wie eine Elektrifizierung dieser Gebiete mittels Wasserkraft funktionieren könnte.

Kleinstwasserkraftanlagen stellen hier eine valide Option zur Energieversorgung dar, da die negativen Auswirkungen der großen Wasserkraftanlagen auf Umwelt und Menschen bei ihnen nicht vorhanden sind und sie netzunabhängig installiert werden können. Kleinstwasserkraftanlagen können rurale Gebiete kontinuierlich mit regenerativer Energie versorgen und gleichzeitig die Umwelt schonen. Andere erneuerbare Energieträger wie Wind- und Solarkraft sind volatil und kurzfristigen Änderungen in der Leistung unterworfen. Dies bedeutet, dass diese oft nur in Kombination mit Batteriespeichern sinnvoll sind, welche jedoch wieder hohe Kosten nach sich ziehen, die in vielen Entwicklungsländern nicht tragbar sind. Die Leistung von Kleinstwasserkraftanlagen unterliegt nur den saisonalen Änderungen des Durchflusses von Fließgewässern und ist daher kontinuierlicher und tragbarer als andere erneuerbare Energieträger (Williamson, et al., 2019, p. 3).

In einigen Ländern kann Kleinstwasserkraft in ruralen Gebieten bereits eine sichere Versorgung mit Strom bewerkstelligen, insbesondere in Vietnam ist die Technologie der Kleinstwasserkraft weitgehend verbreitet. Eine Kommerzialisierung der Kleinstwasserkraft hat jedoch aufgrund verschiedener Hindernisse bisher noch nicht stattgefunden (Edeoja, et al., 2015, pp. 24-25).

Hindernisse der Versorgung ruraler Gebiete mit elektrischer Energie mittels Kleinstwasserkraftanlagen können ökonomischer, geographischer oder politischer Art sein. Da die hohen Kapitalkosten von Kleinstwasserkraftanlagen für Kommunen in Entwicklungsländern meist das schwerwiegendste Problem darstellen, ist die finanzielle Hilfe eines Investors oft unabdingbar. Da Investoren aus dem Wirtschaftsbereich kommen, liegen diesen meist jedoch keine technischen Kenntnisse vor, was die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage erschwert. Daher kann ein Leitfaden, in welchem die Kriterien der Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage abgearbeitet werden von Nutzen sein.

Dazu wird zunächst in Kapitel 2 die Bedeutung und Einsatzmöglichkeiten von Wasserkraftwerken allgemein, sowie die Besonderheiten der Kleinstwasserkraft dargestellt. Dieses Kapitel bietet die Grundlage für alle weiteren Ausführungen. In Kapitel 3 werden die gängigsten Kleinstwasserkraftturbinen in einem Überblick mit deren Vor- und Nachteilen vorgestellt und es wird beschrieben, welche Turbine unter welchen Bedingungen eingesetzt werden sollte. In Kapitel 4 werden aufbauend auf den Turbinentypen existierende Kleinstwasserkraftsysteme vorgestellt. In Kapitel 5 werden die Parameter, welche für den erfolgreichen Einsatz einer Anlage von Bedeutung sind, aufgelistet und erläutert. Als methodisches Vorgehen dient hier eine Literaturrecherche. Es werden wissenschaftliche Publikationen über Kleinstwasserkraftanlagen analysiert und auf Faktoren ausgewertet, welche für den erfolgreichen Einsatz der Anlage von Bedeutung sind. Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 6 eine Checkliste erstellt, anhand dessen ein Investor die Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage für den Einsatz in einem Entwicklungsland abschätzen kann. Da sich Investitionen meist über einen Zeitraum von mehreren Jahren bis Jahrzehnten erstrecken, wird zusätzlich in Kapitel 7 ein Zukunftsausblick der Kleinstwasserkraft in Schwellen- und Entwicklungsländern gegeben.

2. Grundlagen der Kleinstwasserkraft

2.1. Bedeutung der Wasserkraft als Energiequelle

Wasserkraft ist eine regenerative Energiequelle, welche die kinetische und potenzielle Energie des Wassers in nutzbare Energie umwandelt. Die Nutzung der Energie des Wassers geht auf eine Jahrtausende alte Tradition zurück, die bereits in den ersten Hochkulturen Anwendung fand. Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Umwandlung der Energie hauptsächlich mittels Mühlen durchgeführt, welche dann aber durch die effizienteren Turbinen ersetzt wurden. Die mechanische Energie von angetriebenen Mühlen oder Turbinen kann dazu verwendet werden, ein Nutzgerät mechanisch zu betreiben. Meistens wird sie jedoch in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt und dient so zur Erzeugung elektrischen Stroms. Wasserkraft verfügt über ein großes Potential zur Stromerzeugung, wobei dieses abhängig von geographischen, topographischen sowie hydrologischen Faktoren regional sehr stark schwankt. (Giesecke, et al., 2014, pp. 1, 7-8, 35-37)

Wasserkraftwerke können nach technischen Gesichtspunkten in Speicher- und Laufwasserkraftwerke eingeteilt werden. Speicherkraftwerke nutzen Wasser aus einem Stausee zur Stromerzeugung und können Energie in ihrer potenziellen Form speichern. Eine Sonderform stellen Pumpspeicherkraftwerke dar, welche das Wasser in ein höher gelegenes Speicherbecken pumpen und je nach Bedarf wieder abrufen können. Laufwasserkraftwerke hingegen nutzen zur Energieerzeugung die natürliche Strömung von Flüssen oder Bächen. Bei Laufwasserkraftwerken kann eine vorherige Aufstauung des Wassers durch ein Wehr sinnvoll sein. Weiterhin können Wasserkraftanlagen nach ihrer installierten Leistung klassifiziert werden. Die Klassifikationen können sich je nach Gebiet unterscheiden, eine universelle Einteilung existiert nicht. In Tabelle 1 sind die in der EU gültigen Klassifikationen dargestellt. Die in der Tabelle erwähnten Pico-Kraftwerke sind die im deutschen und in dieser Arbeit behandelten Kleinstwasserkraftanlagen.

Tabelle 2-1: Klassifizierung von Wasserkraftanlagen nach installierter Leistung (Williams & Porter, 2006, p. 2)

Classification	Power Output
Large	> 100 MW
Medium	10 – 100 MW
Small	1 – 10 MW
Mini	100 kW – 1 MW
Micro	5 – 100 kW
Pico	< 5 kW

2.2. Leistung einer Wasserkraftanlage

Die theoretische Leistung einer Wasserkraftanlage gibt an, welche Leistung die Anlage ohne Verluste produzieren würde. Die theoretische Leistung kann durch folgende Formel ermittelt werden:

$$P_{theo} = Q \times H \times g \times \delta \quad 2.2-1$$

Mit	P_{theo}	= theoretische Leistung der Anlage	[W]
	Q	= Durchfluss durch das Laufrad	$[\frac{m^3}{s}]$
	H	= Fallhöhe	[m]
	g	= Erdbeschleunigung	$[\frac{m}{s^2}]$
	δ	= Dichte des Wassers	$[\frac{Kg}{m^3}]$

Die tatsächliche Leistung wird jedoch durch Verluste in Turbine und Generator, Reibungen, Umlenkungen, Eintritts- und Austrittsverluste, Querschnittsänderungen, Verschluss- und Regelorgane etc. eingeschränkt. Diese Verluste können im totalen Wirkungsgrad mit der folgenden Formel zusammengefasst werden (Giesecke, et al., 2014, p. 32):

$$\mu_{tot} = \mu_L \times \mu_T \times \mu_{Getriebe} \times \mu_G \times \mu_{Trafo} \times \mu_{Eig} \quad 2.2-2$$

Mit	μ_{tot}	=	Gesamtwirkungsgrad der Anlage	[-]
	μ_L	=	Wirkungsgrad der Triebwasserzuleitung	[-]
	μ_T	=	Wirkungsgrad der Turbine	[-]
	$\mu_{Getriebe}$	=	Wirkungsgrad des Getriebes	[-]
	μ_G	=	Wirkungsgrad des Generators	[-]
	μ_{Trafo}	=	Wirkungsgrad der Umspannanlage, Leitungen etc.	[-]
	μ_{Eig}	=	Eigenversorgung bzw. Bedarf der Anlage	[-]

Wodurch sich für die tatsächliche Leistung einer Wasserkraftanlage die folgende Formel ergibt

$$P_{tat} = Q \times H \times g \times \delta \times \mu_{tot} \quad 2.2-3$$

Mit	P_{tat}	= tatsächliche Leistung der Anlage	[W]
-----	-----------	------------------------------------	-----

Der Durchfluss Q und die Fallhöhe H können durch die Wahl des Standortes beeinflusst werden. Der Wirkungsgrad kann insbesondere durch technische Faktoren optimiert werden.

2.3. Besonderheiten der Kleinstwasserkraft

2.3.1. Allgemeine Aspekte der Kleinstwasserkraft

Bei Kleinstwasserkraftanlagen handelt es sich um Laufwasserkraftwerke, welche eine installierte Leistung von 5 kW nicht überschreiten, wobei der Großteil der existierenden Anlagen meist eine Leistung zwischen 200 W und 1 kW erzeugt (Green, et al., 2005, p. 2). Aufgrund der gering installierten Leistung kommen die Anlagen ohne Wasserspeicher oder vorherige Aufstauung des Wassers durch ein Wehr aus. Ein großer Vorteil der Kleinstwasserkraft ist, dass diese bereits bei sehr geringen Fallhöhen von 1 m und sehr geringen Durchflüssen von 1 l/s arbeiten können (Lahimer, et al., 2012, p. 5862). Es existiert eine Vielzahl von verschiedenen Turbinen für Wasserkraftanlagen, welche abhängig von der verfügbaren Fallhöhe und dem Durchfluss eingesetzt werden. Die Turbinen der Anlagen können dabei eine horizontal oder vertikal ausgerichtete Welle haben. In Abbildung 2-1 sieht man eine Kleinstwasserkraftanlage mit vertikal ausgerichteter Welle.



Abbildung 2-1: Kleinstwasserkraftanlage mit vertikal ausgerichteter Welle (Brian, et al., 2013)

Die mechanische Energie der Turbine kann zum einen dafür genutzt werden, eine mechanische Last, wie z.B. eine Getreidemühle direkt anzutreiben. Überwiegend ist es jedoch der Fall, dass ein Generator die mechanische Energie der Turbine nach Prinzip der elektromagnetischen Induktion in Strom umwandelt, welcher über das Verteilersystem Haushalte oder Gewerbe versorgen kann. Oft werden Kleinstwasserkraftsysteme ausschließlich für den häuslichen Gebrauch, insbesondere für die Beleuchtung eingesetzt. Kleinstwasserkraftwerke haben einen relativ geringen Wirkungsgrad im Bereich von 45% (Maher & Smith, 2001, p. 4.1). Bei größeren Wasserkraftwerken liegt dieser Wert bei 80% oder höher (Giesecke, et al., 2014, p. 22). In Abbildung 2-2 ist das typische Schema eines Kleinstwasserkraftsystems aufgezeigt.

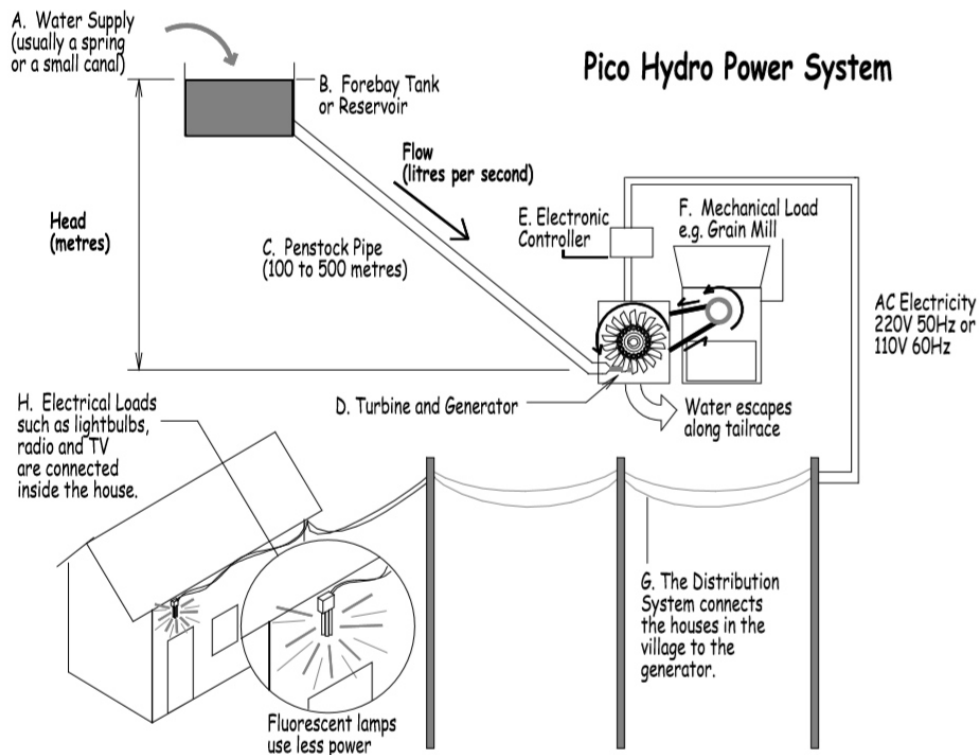


Abbildung 2-2: Schema einer Kleinstwasserkraftanlage (Maher & Smith, 2001, p. 2.1)

Die notwendigen Bauarbeiten für die Anlagen sind sehr gering und aufgrund der geringen Komplexität ist auch eine lokale Manufaktur der Anlagen möglich. Da die Anlagen sehr standortspezifisch sind und an die Gegebenheiten des Plangebiets angepasst werden müssen, ist eine lokale Manufaktur häufig sinnvoller als ein Serienprodukt auf dem Markt zu kaufen (Edeoja, et al., 2015, p. 24). Bei Installation und Haltung der Anlage ohne die nötige technische Expertise bestehen jedoch große Gefahren für die Gesundheit und Sicherheit des Menschen. Dies gilt insbesondere für das Kabelsystem, welches häufig keine Isolation besitzt und somit ein hohes Sicherheitsrisiko darstellt (Lahimer, et al., 2012, p. 5867).

Kleinstwasserkraftanlagen arbeiten überwiegend im Inselbetrieb und sind nicht an das nationale Stromnetz angeschlossen. Es wird elektrischer Strom zu Dörfern, einzelnen Haushalten oder Werkstätten geliefert. Die Anlagen können nicht wie Dieselgeneratoren an die Verbrauchsschwankungen des Tages angepasst werden, unterliegen diesen jedoch weniger als die erneuerbaren Energieträger der Wind- oder Solarkraft. In Peak Zeiten kann es zu Stromknappheit kommen, während zu Zeiten mit geringem Bedarf ein Überschuss an Strom produziert wird. Dies könnte durch ein zusätzlich angeschlossenen Batteriespeicher reguliert werden, worauf jedoch aufgrund der hohen Kosten meist verzichtet wird. Saisonal schwankende Durchflüsse der Fließgewässer können verhindern, dass die Anlage das gesamte Jahr über eingesetzt wird. Die Anlage produziert nicht genug Energie während der Trockenzeit und in Regenzeiten besteht die Gefahr, dass die Anlage aufgrund ihrer geringen Größe weggeschwemmt wird. Typische Einsatzzeiten von Kleinstwasserkraftanlagen liegen bei acht Monaten bis zu einer gesamtjährigen Nutzung (Edeoja, et al., 2015, p. 23).

2.3.2. Ökonomische, ökologische und soziale Aspekte der Kleinstwasserkraft

Für die Betrachtung der ökonomischen Aspekte von Kleinstwasserkraftanlagen spielen die Kapitalkosten für Beschaffung der Anlage, Zubehör und bautechnische Maßnahmen sowie die laufenden Kosten nach Installation der Anlage eine Rolle. Ein Faktor, der insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern eine Hürde für den Einsatz von Kleinstwasserkraftanlagen zur Elektrifizierung darstellt, sind die hohen Kapitalkosten. Zur Finanzierung der Anlagen müssen häufig Investoren in Form von finanziellen Institutionen oder Mikrokredit-Organisationen zu Hilfe genommen werden. Trotz der hohen Kapitalkosten sind die Stromgestehungskosten von Kleinstwasserkraftanlagen, welche sowohl Kapital- und laufende Kosten beinhalten, auch im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energieträgern nur sehr gering. Dies lässt sich auf die sehr geringen laufenden Kosten zurückführen. Eine Studie der World Bank Energy Unit stellte für Kleinstwasserkraftanlagen die niedrigsten Stromgestehungskosten unter Netzunabhängigen Energieerzeugern fest (ESMAP, 2007, pp. 13-14). In folgender Abbildung ist ein Vergleich der Stromgestehungskosten für unterschiedliche Energieträger dargestellt.

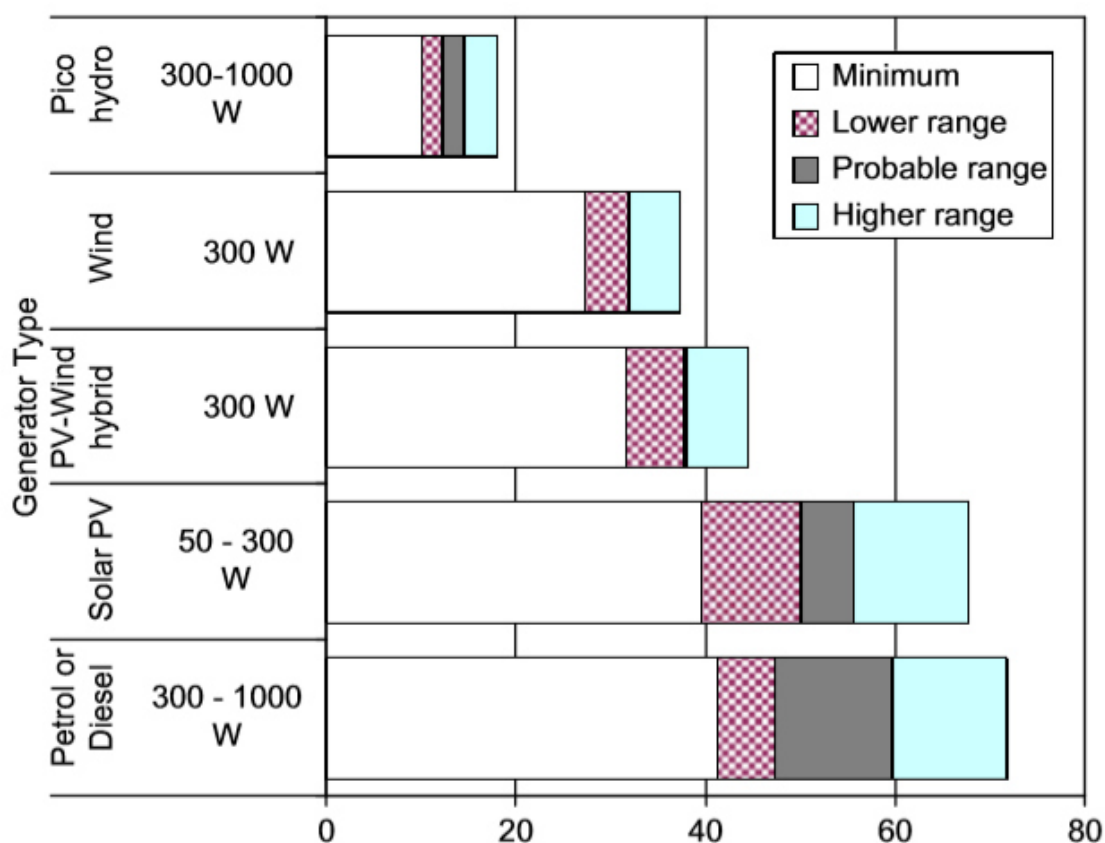


Abbildung 2-1: Stromgestehungskosten für netzunabhängige Stromversorgung verschiedener Energieträger (US cents/kWh) (Williams & Simpson, 2009, p. 1987)

Unter Betrachtung der ökologischen Aspekte weisen Kleinstwasserkraftanlagen nur sehr wenige Nachteile auf. Während der Bau und Betrieb größerer Wasserkraftanlagen meist einen erheblichen Einfluss auf die Umwelt ausübt, zeigen Kleinstwasserkraftanlagen nur marginale Effekte auf die Umwelt auf. Die meisten negativen Folgen der Wasserkraft resultieren aus der Aufstauung des Wassers und der Störung der Strömung des Fließgewässers. Der notwendige Bau von Stauseen für größere Wasserkraftanlagen hat vielfältige Folgen auf die Umwelt. So werden große Gebiete überschwemmt und Lebensräume von Tieren und Pflanzen zerstört. Zerfällt die überflutete Biomasse im Wasser, entstehen große Mengen Methangas, welches erheblich stärker zum Treibhauseffekt beiträgt als Kohlendioxid. Weiterhin stellen Wehre eine künstliche geschaffene Barriere da, welche eine Wanderung von aquatischen Lebewesen verhindert. Diese negativen Folgen entfallen bei Kleinstwasserkraftanlagen dadurch, dass Wehre und größere Wasserspeicher oder -reservoirs nicht benötigt werden.

Pascalea et al. (2011) führten in einer Kommune in Thailand eine Ökobilanzierung einer 3 kW Kleinstwasserkraftanlage, einem Dieselgenerator und eines Anschlusses an das nationale Stromnetz durch und verglichen diese miteinander. Dabei gemessene Größen waren unter anderem das Klimaerwärmungspotenzial, die Ressourcenausbeutung und der Energiebedarf. Die Analyse hatte das Ergebnis, dass Kleinstwasserkraftanlagen in allen Kategorien bei weitem den schwächsten ökologischen Fußabdruck hinterlassen. Die größten Umwelteinflüsse der Kleinstwasserkraftanlage kamen dabei von dem Verteilersystem.

Da in vielen ruralen Gebieten in Entwicklungsländern Dieselgeneratoren zur Stromerzeugung genutzt werden, wird durch Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage auch die Kohlenstoffdioxid-Emission verringert. Auch die umliegende Umwelt wird geschützt, da Abholzung in der Nähe befindlicher Bäume, ein häufiges Mittel zur Energiegewinnung in Entwicklungsländern, nicht mehr nötig ist.

Während große Wasserkraftanlagen durch ihre starken Eingriffe in Natur, Landschaft und umliegende Ansiedlungen in der Bevölkerung oft auf Ablehnung stoßen, haben Kleinstwasserkraftanlagen diese Nachteile größerer Anlagen nicht, was zu einer hohen sozialen Akzeptanz führt. Da keine schwerwiegenden bautechnischen Maßnahmen durchgeführt werden müssen, sind auch keine Umsiedlungen von Anwohnern notwendig, wie es beim Bau von größeren Wasserkraftanlagen oft der Fall ist. Auch die visuellen Eingriffe in das Landschaftsbild durch Kleinstwasserkraftanlagen halten sich in Grenzen, was die soziale Akzeptanz der Anlage erhöht. Oft werden die Bewohner der zu versorgenden Haushalte in die Installation miteingebunden und ihnen werden die nötigen technischen Fertigkeiten zur Haltung und Wartung der Anlage beigebracht. Dies kann die soziale Akzeptanz der Anlage erheblich erhöhen. Ein weiterer Faktor, der die soziale Akzeptanz erhöht, ist, dass bei Betrieb der Anlage keine unangenehmen Sinneseindrücke entstehen, wie es z.B. bei Dieselgeneratoren oder Biogasanlagen der Fall ist.

2.3.3. Kleinstwasserkraftanlagen in Schwellen- und Entwicklungsländern

Kleinstwasserkraftanlagen sind unter Betrachtung der in Kapitel 2.3.2 erläuterten ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte insbesondere für den Einsatz in ruralen, dünn besiedelten Gebieten in Schwellen- und Entwicklungsländern geeignet. Es ist eine kostengünstige und autarke Stromversorgung einzelner Haushalte, Dörfer oder Betriebe möglich. Eine Reihe von abgeschlossenen oder laufenden Projekten konnte bereits den erfolgreichen Einsatz von Kleinstwasserkraftanlagen in den verschiedensten Schwellen- oder Entwicklungsländern belegen. Hierzu gehören u.a. Laos (Energy for Life, 2011), Thailand (Chuenhooklin, 2006) oder Ecuador (Zeiselmair, et al., 2013). Im Großteil dieser Fälle sind die Anlagen nicht an das nationale Stromnetz angeschlossen und arbeiten im Inselbetrieb. Eine weitgehende kommerzielle Verbreitung hat jedoch trotz zahlreicher erfolgreicher Projekte noch nicht stattgefunden (Edeoja, et al., 2015, p. 24). Auf die Faktoren, die einer kommerziellen Verbreitung im Wege stehen und die für einen erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage von Bedeutung sind, wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

2.3.4. Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von Kleinstwasserkraftanlagen ist in folgender Tabelle noch einmal komprimiert dargestellt.

Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile von Kleinstwasserkraftanlagen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Erneuerbarer Energieträger• Bereits bei sehr geringen Fallhöhen und Durchflüssen einsetzbar• Kein Aufstauen oder Speichern des Wassers notwendig• Geringer bis kein ökologischer Einfluss• Wenige bautechnische Maßnahmen notwendig• Lokale Manufaktur möglich• Simple und kostengünstige Haltung und Wartung• Geringe Stromgestehungskosten• Hohe soziale Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none">• Hohe Kapitalkosten• Kein Regulieren der Leistung während Peak Zeiten möglich• Geringe Wirkungsgrade im Vergleich zu größeren Wasserkraftwerken• Anlage ggf. aufgrund saisonaler Bedingungen nicht das gesamte Jahr über nutzbar• Sicherheitsrisiken bei Installation ohne technische Expertise

3. Darstellung der gängigsten Kleinstwasserkraftturbinen

Der Turbinentyp einer Kleinstwasserkraftanlage ist unter anderem maßgebend für die Anschaffungskosten, die produzierte Leistung und den Aufwand der Installation und bildet den Kern jeder Kleinstwasserkraftanlage. Dabei weist jeder Typ von Turbine seine eigenen Charakteristiken auf und die Wahl muss den regionalen Gegebenheiten angepasst werden. Im Folgenden sollen die gängigsten Turbinentypen von Kleinstwasserkraftanlagen dargestellt und deren Vor- und Nachteile erläutert werden. Dabei wird unterschieden zwischen Gleichdruckturbinen, bei welchen sich der Wasserdruck beim Durchströmen der Turbine nicht ändert und Überdruckturbinen, bei welchen der Wasserdruck bei Eintritt in die Turbine am höchsten ist und bis zum Austritt kontinuierlich abnimmt.

3.1. Gleichdruck-/Impulsturbinen

Bei Gleichdruckturbinen, auch als Impulsturbinen bezeichnet, weist das Wasser vor und hinter dem Laufrad denselben Wasserdruck auf und die höchste Effizienz zeigt sich bei hohen Fallhöhen und geringen Durchflüssen. Die verwendbare Leistung der Turbine kommt ausschließlich aus der Umwandlung der Bewegungsenergie des Wassers nach Prinzip der Bernoulli'schen Energiegleichung. Turbinen dieser Art sind meist von simplem Design und kostengünstig (Elbatran, et al., 2015, p. 86).

3.1.1. Pelton-Turbine

Die Pelton-Turbine wurde 1880 vom amerikanischen Ingenieur Lester Pelton entwickelt und ist eine Freistrahlturbine, die bei hohen Fallhöhen und geringen bis mittleren Durchflüssen ihren Einsatz findet. Da für diesen Turbinentyp größere Fallhöhen nötig sind, finden sie ihren Einsatz insbesondere in Ländern wie Nepal, deren Topografie überwiegend Hochgebirge aufweist. Das Wasser strömt mit hoher Geschwindigkeit aus einer oder mehrerer Düsen auf die Schaufeln des Laufrades der Pelton-Turbine, wobei die Schaufelräder die Form von Halbkugeln haben. Vorteile der Pelton-Turbine sind der hohe Wirkungsgrad und, dass nur relativ geringe Wassermengen benötigt werden. Ein Nachteil ist, dass die Schaufelräder eine hohe Verschleißanfälligkeit aufweisen. Pelton-Turbinen können eine sowohl horizontal als auch vertikal ausgerichtete Welle haben. (Elbatran, et al., 2015, p. 87)



Abbildung 3-1: In Sri Lanka lokal hergestellte Pelton-Turbine (Maher & Smith, 2001, p. 8.3)

3.1.2. Turgo-Turbine

Die Turgo-Turbine ist eine quer durchströmte Wasserturbine und wurde 1919 von Gilbert Gilkes als Modifikation der Pelton-Turbine entwickelt. Sie wird bei mittleren bis hohen Fallhöhen und geringen bis mittleren Durchflüssen eingesetzt. Ein Vorteil gegenüber der Pelton-Turbine, der insbesondere in Entwicklungsländern eine wichtige Rolle spielt, sind die geringeren Herstellungskosten. Die Turbine kann bei gleichem



Abbildung 3-2: Turgo-Turbine (Koukouvinis, et al., 2011)

Durchmesser einen größeren Durchfluss bewältigen als die Pelton-Turbine. Zusätzlich ist bei mittleren Fallhöhen kein Übertragungssystem zwischen Turbine und Generator notwendig, was die Kosten verringert. Turgo-Turbinen weisen im Vergleich jedoch meist eine geringere Effizienz auf. Die Schaufelräder sind geformt wie die der Pelton-Turbine, nur dass diese längs nach in der Hälfte durchgeschnitten sind. Turgo-Turbinen sind sehr beliebte Turbinen für die Kleinstwasserkraft (Uniyal, et al., 2016, p. 365). Sie kommt mit verschiedenen Designs und ist weltweit, auch in Industrienationen verbreitet. (Lahimer, et al., 2012, p. 5863)

3.1.3. Durchströmturbine

Die Durchströmturbine (engl. Cross-flow turbine) ist auf den Australier Anthony Michell und den Ungar Donár Bánki zurückzuführen und arbeitet bei Nutzfalldhöhen zwischen 2-200 m bei einem sehr variablen Durchfluss. Bei einer Durchströmturbine wird der Turbinenläufer anders als üblich nicht axial oder radial, sondern quer durchströmt. Die Welle der Turbine kann sowohl vertikal als auch horizontal ausgerichtet sein. Die einfache Turbinenkonstruktion ermöglicht niedrige



Abbildung 3-3: Durchströmturbine (Neromylos, 2020)

Betriebskosten und eine lokale Manufaktur, was für den Einsatz in Entwicklungsländern eine entscheidende Rolle spielt. Ein zusätzlicher Vorteil ist der flache Wirkungsgradverlauf. Obwohl diese Turbine den Vorteil hat, dass sie einfach und lokal herzustellen ist, sorgt die enorme Größe und langsame Drehzahl dafür, dass viele Länder diese Turbinenart nicht verwenden (Lahimer, et al., 2012, p. 5864). Im Vergleich zur Pelton-Turbine kann diese bei geringeren Nutzfalldhöhen und höheren Durchflüssen arbeiten, besitzt jedoch einen geringen Spitzenwirkungsgrad. (Elbatran, et al., 2015, p. 87)

3.2. Überdruck-/Reaktionsturbine

Überdruck- bzw. Reaktionsturbinen sind das Gegenstück zu Gleichdruckturbinen und weisen die höchste Effizienz bei geringen Fallhöhen und hohen Durchflüssen auf. Das Arbeitsmedium Wasser weist vor dem Laufrad einen höheren statischen Druck auf als dahinter. Überdruckturbinen generieren Energie durch die Kombination von Druck und sich bewegendem Wasser. Das Hauptmerkmal einer Reaktionsturbine ist, dass nur ein Teil des am Eintritt in die Turbine anstehenden Drucks in Geschwindigkeit umgewandelt wird, bevor das Wasser auf das Laufrad trifft.

3.2.1. Kaplan-/Propellerturbine

Bei Propeller- und Kaplan-Turbinen handelt es sich um axial angeströmte Wasserturbinen. Meist werden diese Turbinen bei einer geringen Fallhöhe und hohen Durchflüssen eingesetzt. Kaplan-Turbinen sind eine Weiterentwicklung der Propellerturbine und besitzen im Vergleich zu diesen eine bewegliche Laufradschaufel. Dies bewirkt, dass auch für stark dynamische Durchflüsse ein hoher Wirkungsgrad erzielt werden kann. Die beweglichen Laufradschaufeln sind jedoch auch mit höheren Kosten verbunden, weshalb beim Einsatz in Entwicklungsländern meist darauf verzichtet

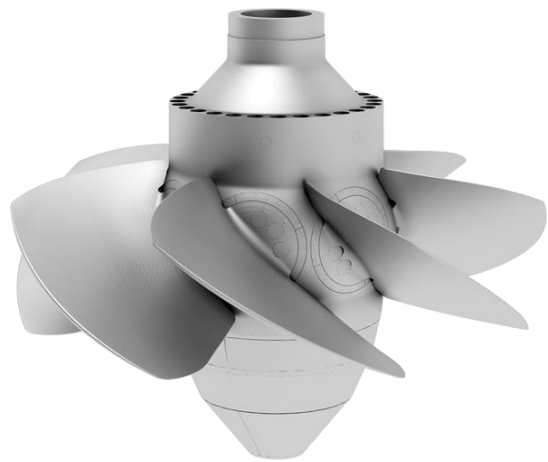


Abbildung 3-4: Kaplan-Turbine (Kaplan Inc, 2020)

wird und vorwiegend Propellerturbinen zum Einsatz kommen. Die Wellen beider Turbinenarten können vertikal oder horizontal ausgerichtet sein. (Elbatran, et al., 2015, p. 88)

Da die Turbinen nur eine geringe Nutzfallhöhe benötigen, finden Sie vor allem in Gegenden mit Flachland ihren Einsatz. In Laos ist dies der vorherrschende Kleinstwasserkraftturbinentyp. (LIRE, 2008, p. 6).

3.2.2. Francis-Turbine

Die Francis-Turbine ist eine nach dem Ingenieur James B. Francis benannte, sehr universell einsetzbare Wasserturbine, bei der das Laufrad radial angeströmt wird und die meist als Spiralturbine ausgeführt wird. Dabei wird das zufließende Wasser über ein schneckenförmiges Gehäuse am Umfang der Turbine verteilt. Durch ihre universelle Einsatzweise und ihre einfache und robuste Bauweise, ist sie die meist eingesetzte Turbine in der Wasserkraft.



Abbildung 3-5: Francis-Turbine
(Global Hydro, 2020)

Der Einsatzbereich liegt bei mittleren Durchflüssen und Fallhöhen. Der Einsatzbereich der Francis-Turbine überschneidet sich mit demjenigen der Pelton- und der Kaplan-Turbine. Im Vergleich zu Pelton-Turbinen kann eine Francis-Turbine bei kleineren Abmessungen höhere Durchflüsse verarbeiten. Der Wirkungsgrad ist jedoch stark von der Beaufschlagung abhängig. Die Welle ist meist vertikal und in seltenen Fällen horizontal ausgerichtet. (Elbatran, et al., 2015, p. 88)

3.2.3. Pump as Turbine (PAT)

Pump as Turbine (PAT) ist eine unkonventionelle Art der Reaktionsturbine, die sich ähnlich zu der Francis-Turbine verhält. Im Gegensatz zur konventionellen Turbine, dessen Manufaktur an die Anforderungen des Standortes angepasst wird, sind Pumpen global und in den verschiedensten Varianten und Größen erhältlich. Wenn diese als Turbine statt als Pumpe genutzt werden, bewegt sich der Rotor in die entgegengesetzte Richtung und kann so durch einen Motor Elektrizität erzeugen. Daher sind PATs auch als Pump in Reverse bekannt.

Pumpen, die im Rückwärtsmodus laufen sind weit verbreitet, was sich als geeignete und attraktive Option für die Erzeugung von Wasserkraft mit geringer Fallhöhe in abgelegenen Gebieten herausstellt. Diese Situation gilt insbesondere an Orten, an denen konventionelle Kleinstwasserkraftturbinen unzureichend oder unerschwinglich sind. (Lahimer, et al., 2012, p. 5865)



Abbildung 3-6: Pump as Turbine (Roth Pump Company, 2020)

PATs gelten als weniger kompliziert als konventionelle Turbinen, da sie technisch einfach zu fabrizieren sind. Sie sind einfach und kostengünstig zu entwerfen, installieren, betreiben und warten, mit dem zusätzlichen Vorteil, dass all dies lokal durchgeführt werden kann. Sie wurden in einigen weniger entwickelten Ländern wie Thailand (Border Green Energy Team, 2006) und Kenia (Maher, et al., 2003) erfolgreich für Wasserkraftwerke mit geringer Fallhöhe nachgewiesen und eingesetzt. Ein Nachteil der PATs ist jedoch der relativ geringe Wirkungsgrad. (Lahimer, et al., 2012, p. 5865)

3.2.4. Tesla-Turbine

Die Tesla-Turbine ist eine schaufellose Turbine, die von Nikola Tesla im Jahre 1909 erfunden und patentiert wurde. Die Turbine verfügt über mehrere rotierende Scheiben, die die Flüssigkeitsviskosität des Wassers zur Stromerzeugung verwenden. Wenn sie angetrieben wird, findet sie auch eine Anwendung als Pumpe. Sie wird für mittlere Fallhöhen und Durchflüsse eingesetzt. Da ihre Konstruktion und Komponenten einfach und leicht zu handhaben sind, ist lokale Manufaktur möglich und es herrschen geringere Kosten und Wartungsanforderungen im Vergleich zu



Abbildung 3-7: Tesla-Turbine (HomeConstructor, 2020)

konventionellen Schaufelturbinen. Diese Eigenschaften machen die Tesla-Turbine zu einer idealen und eigenständigen Option für Haushalte mit niedrigem Einkommen in ländlichen Gebieten. Ein Nachteil der Tesla-Turbine besteht jedoch in der Größe und im relativ hohen Gewicht. (Lahimer, et al., 2012, p. 5866)

3.3. Zusammenfassung

In folgenden Tabellen werden die verschiedenen Turbinen der Anschaulichkeit halber noch einmal mit ihren Vor- und Nachteilen komprimiert dargestellt.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Gleichdruckturbinen mit Vor- und Nachteilen

	Pelton-Turbine	Turgo-Turbine	Durchströmturbine
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Hohe Fallhöhen• Geringe Durchflüsse	<ul style="list-style-type: none">• Mittlere bis hohe Fallhöhe• Geringer bis mittlerer Durchfluss	<ul style="list-style-type: none">• Mittlere Fallhöhe• Variabler Durchfluss
Vorteile	<ul style="list-style-type: none">• Hoher Wirkungsgrad• Nur geringe Wassermengen notwendig	<ul style="list-style-type: none">• Geringe Herstellungskosten• Bei mittleren Fallhöhen kein Übertragungssystem zwischen Turbine und Generator notwendig	<ul style="list-style-type: none">• Flacher Wirkungsgradverlauf• Einfache Turbinenkonstruktion• Niedrige Betriebskosten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none">• Verschleißanfälligkeit an Schaufeln	<ul style="list-style-type: none">• Geringerer Wirkungsgrad als Pelton-Turbine	<ul style="list-style-type: none">• Geringer Spitzenwirkungsgrad
Weiteres	<ul style="list-style-type: none">• Einsatz überwiegend im Hochgebirge• Vertikal oder horizontal ausgerichtete Welle• Halbkugelförmige Schaufelräder	<ul style="list-style-type: none">• Quer durchströmt• Schaufelräder wie die der Pelton-Turbine längs in der Hälfte geteilt	<ul style="list-style-type: none">• Quer durchströmt und dadurch doppelter Aufschlag• Vertikal oder horizontal ausgerichtete Welle

Tabelle 3-2: Zusammenfassung der Überdruckturbinen mit Vor- und Nachteilen

	Kaplan-/Propellerturbine	Francis-Turbine	PAT	Tesla-Turbine
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Fallhöhe • Mittlere bis hohe Durchflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Fallhöhe • Mittlerer Durchfluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Fallhöhen • Variable Durchflüssen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Fallhöhe • Mittlerer Durchfluss
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Kaplan-Turbine an Durchfluss anpassbar • Effizient 	<ul style="list-style-type: none"> • Robuste und einfache Bauweise • Anpassungsfähigkeit an Variationen in Fallhöhe und Durchfluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsetzbar bei sehr variablen Durchflüssen • Global erhältlich • Geringe Wartungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaufellos • Lokale Manufaktur möglich • Geringe Kosten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Kaplan-Turbine mit hohen Kosten verbunden 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsgrad stark von Beaufschlagung abhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Gewicht • Sehr groß
Weiteres	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal oder vertikal ausgerichtete Welle • Kaplan-Turbinen besitzen bewegliche Laufradschaufeln 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr universell einsetzbar • Am meist verbreiteter Turbinentyp • Meist vertikal, selten horizontal ausgerichtete Welle 	<ul style="list-style-type: none"> • In verschiedensten Varianten und Größen erhältlich • Standardisiertes Produkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kann auch als Pumpe Anwendung finden

4. Gängige Kleinstwasserkraftsysteme

Nach Darstellung der unterschiedlichen Turbinentypen der Kleinstwasserkraft, werden in diesem Kapitel existierende und gängige Systeme der Kleinstwasserkraft behandelt. Dieses Kapitel soll einen Überblick darüber geben, welche Kleinstwasserkraftsysteme bereits Anwendung finden und wie diese aufgebaut sind. Es existiert eine Vielzahl von Systemen, welche in Schwellen- und Entwicklungsländern in Nutzung sind und in dieser Arbeit wird sich auf die Darstellung fünf gängiger Systeme beschränkt.

4.1. Peltric Set

Ein Peltric Set (Abk. „Pelton“ + „Electric“) ist die Kombination einer Pelton-Turbine mit einem Induktionsgenerator. Dieser Anlagentyp wurde 1991 in Nepal für Fallhöhen zwischen 20-50 m entwickelt. Als Druckleitung wird lediglich ein Schlauch benötigt. Ein Peltric Set hat sehr gering installierte Leistungen im Bereich von 60 W und wird oft nur für einzelne Haushalte eingesetzt. Es ist insbesondere für Gebiete ausgelegt, in denen hohe Fallhöhen möglich sind aber nur Fließgewässer mit geringen Durchflüssen vorhanden sind. Dieses Set kann bei Bedarf in einen vorhandenen Bremsdrucktank („break pressure tank“) einer Trinkwasserversorgungsleitung angeschlossen werden. Die Welle der Turbine ist vertikal ausgelegt und direkt an den Induktionsgenerator angeschlossen. Das Peltric Set ist einfach zu installieren, zu betreiben und zu warten und erschwinglich für die meisten Haushalte mit geringem Einkommen. (Bhattaraia & Joshi, 2011, p. 2) (Lahimer, et al., 2012, pp. 5862-63)

4.2. Low-cost DC Pico Hydro System

Dieser Kleinstwasserkraftsystemtyp wurde in Südamerika in Kolumbien entwickelt und besteht aus einer kleinen Pelton-Turbine mit einer horizontalen Welle, welche über eine Riemenscheibe mit einem 12-V-Gleichstrom-Fahrzeuggenerator verbunden ist. Die Hauptmerkmale dieser Konstruktion sind, dass sie einfach und leicht vor Ort herzustellen ist und der Generator mit einem Spannungsregler ausgestattet ist. Außer dem Spannungsregler, der bereits im Generator enthalten ist, wird kein zusätzliches Steuersystem benötigt (Lahimer, et al., 2012, p. 5863). So wird Geld gespart, indem nicht für ein neues Steuerungssystem bezahlt werden muss. Mit diesem System können neben oder statt dem Generator auch andere mechanische Lasten betrieben werden. Da Gleichstrom erzeugt wird, ist keine Frequenzregelung erforderlich, aber der Strom muss, um zu hohe Verluste zu vermeiden in der Nähe oder am Generator selbst verwendet werden (Maher & Smith, 2001, p. 8.1).

4.3. Pico Power Pack (PPP)

Das Pico Power Pack (PPP) kombiniert die Stahlwinkelbasis und horizontale Welle des Low-cost DC Pico Hydro System mit dem einfachen Design einer Pelton-Turbine. Es wird ein Induktionsgenerator direkt angetrieben. Das PPP wurde Ende des 20. Jahrhunderts an der Nottingham Trent University mit Hilfe eines deutschen Austauschstudenten, Lutz Homeier, entwickelt und wurde in Nepal getestet. Um die finanzielle Rentabilität der Anlage zu verbessern, können tagsüber bei geringem Strombedarf andere Geräte, z.B. für die landwirtschaftliche Nutzung angetrieben werden. Dieser Anlagentyp ist für Inspektionen und Wartungen leicht zugänglich und mit Kondensatoren und Geräten zur Wechselstromerzeugung und Spannungsregelung ausgestattet. Da das PPP Wechselstrom erzeugt, kann der Strom bis zu 1 km vom Kraftwerk entfernt wirtschaftlich genutzt werden. Die für das PPP benötigte Durchflussrate und Förderhöhe beträgt normalerweise 3–15 l/s bzw. 25–100 m. (Lahimer, et al., 2012, p. 5863)

4.4. Motor Dynamo Based Family Hydro (MDFH)

Das Motor Dynamo Based Family Hydro (MDFH) ist auch als Hydro Home System (HHS) bekannt. Dieser Anlagentyp wurde 2007 vom Center for Rural Technology und der Katmandu University in Nepal mit Unterstützung der Lemelson Foundation in den USA entwickelt. Dieses System umfasst eine kleine Pelton-Turbine, welche mit einem 12-V-Autodynamo gekoppelt ist. Der Einsatzbereich liegt normalerweise bei einer Förderhöhe von 20-30 m mit einer Durchflussrate von 1-2 l/s. Die installierte Leistung ist sehr gering und liegt im Bereich von 60-100 W. Die nötigen Bedingungen des Wasserdurchflusses und der Förderhöhe können, falls diese vorhanden ist, der häuslichen Wasserversorgung entnommen werden. Der von MDFH erzeugte Strom reicht aus, um den Strombedarf eines Haushalts in den Berggebieten zu decken. (Anup, et al., 2010, pp. 338-39)

4.5. PowerPal

PowerPal ist ein Kleinstwasserkraftsystem, welches in Hanoi in Vietnam von einem kanadischen Unternehmen für den Einsatz von Anlagen mit niedrigen Fallhöhen entwickelt wurde und kann Leistungen zwischen 200-1000 W erzeugen. Es wird eine vertikal ausgerichtete Propellerturbine genutzt, welche an einen einfachen Wechselstrom-Einphasengenerator angeschlossen ist. PowerPal ist für Fallhöhen zwischen 1-2 m ausgelegt. Das System ist in weniger entwickelten Ländern weit verbreitet und wird mittlerweile in über 60 Ländern verkauft. PowerPal ist leicht und transportabel und erfordert daher nur minimale Bauarbeiten. Zusätzlich ist es simpel zu installieren, hat geringe Wartungskosten und ist nahezu ohne laufende Kosten. Darüber hinaus hat der Hersteller PowerPal mit einem Spannungswandler ausgestattet um Spannungsschwankungen und damit einhergehende Belastungen der Endgeräte zu vermeiden. (Lahimer, et al., 2012, p. 5863) (Green, et al., 2005, p. 16)

5. Faktoren für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Faktoren, die für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Schwellen- oder Entwicklungsland maßgeblich sind und bildet die Grundlage für die im anschließenden Kapitel erstellte Checkliste. Die Liste ist allgemein gehalten und nicht abschließend, da sich die jeweiligen Situationen in den verschiedenen Entwicklungsländern stark unterscheiden können. Die Liste kann je nach Standort durch weitere, wie z.B. rechtliche oder Nachhaltigkeitsfaktoren ergänzt werden.

5.1. Hydrologische Faktoren

Um eine effiziente Stromerzeugung der Kleinstwasserkraftanlage zu gewährleisten, muss die Wahl des Anlagentyps an die hydrologischen Verhältnisse des Standortes angepasst werden. Hierzu spielen insbesondere das Wasserdargebot und die Abflussdynamik des Fließgewässers, in welchem die Anlage platziert wird, eine Rolle. Für die Ausgestaltung und die Dimensionierung der Anlage und aller zugehörigen Bauwerke ist eine Kenntnis über die hydrologischen Parameter entscheidend. Es muss abgewägt werden, ob die Anlage auch unter besonderen Betriebsfällen wie Hoch- oder Niedrigwasser laufen kann. Wesentliche Grundlagen hierfür sind Erhebungen über das Abflussverhalten vor Ort sowie im Einzugsgebiet. Um die Extremwerte mitzubetrachten, sollten die Erhebungen sich über einen möglichst langen Zeitraum erstrecken. Um zutreffende Aussagen zu treffen, sollten die Erhebungen für einen Zeitraum von 10-25 Jahren vorliegen. In Entwicklungsländern steht meist nur eine unzureichende bis keine Datenmenge zur Verfügung, jedoch können mithilfe statistischer Verfahren entsprechende Daten synthetisch erzeugt werden. Zusätzlich können, falls entsprechende Daten vorhanden sind, Niederschlagsaufzeichnungen und Verdunstungswerte hilfreich sein. (Giesecke, et al., 2014, p. 61)

Das wichtigste Hilfsmittel für die Abschätzung der hydrologischen Verhältnisse stellt die Abflussdauerlinie dar, welche die Tageswerte der Durchflüsse in aufsteigender Reihenfolge darstellt. Aus der Abflussdauerlinie lassen sich folgende Kennwerte, die für die Planung einer Kleinstwasserkraftanlage von Bedeutung sind, ablesen: (Giesecke, et al., 2014, p. 60)

- Höchster Abflusswert HQ
- Mittelwasserabfluss MQ
- Niedrigster Abflusswert NQ
- Median- oder Zentralwert des Abflusses ZQ

Eine exemplarische Abflussdauerlinie mit Ganglinie eines Jahres ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

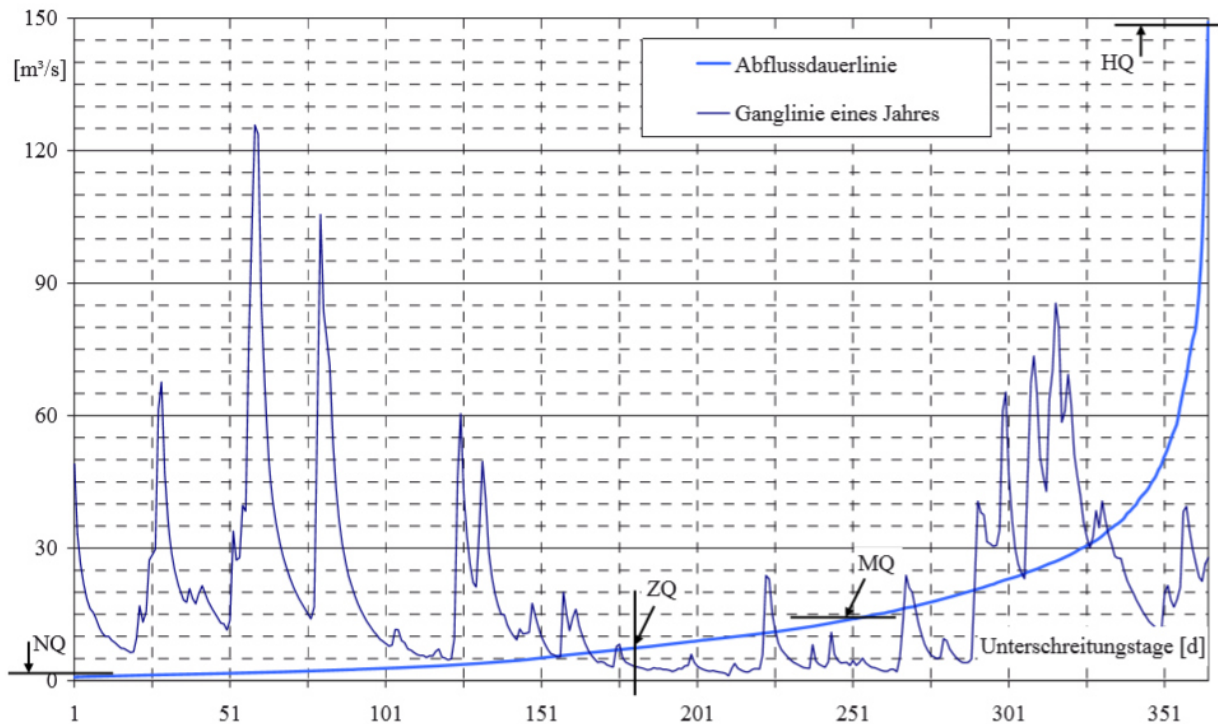


Abbildung 5-1: Exemplarische Abflussdauerlinie mit Ganglinie eines Jahres (Giesecke, et al., 2014, p. 61)

Zusätzlich sollten die Auswirkungen des Klimawandels auf die hydrologischen Parameter beachtet werden. Diese sind jedoch sehr komplex und nicht allgemeingültig zu klären. Anhand diverser Szenarien lassen sich jedoch Trends erkennen, welche in einigen Regionen zu einer Erhöhung und in anderen Regionen zu einer niedrigeren Stromerzeugung durch Wasserkraft führen. Diese Szenarien sind jedoch nicht zu pauschalisieren und für jedes Projekt einzeln zu betrachten. (Giesecke, et al., 2014, p. 62)

5.2. Technische Faktoren

In diesem Unterkapitel werden die wichtigsten technischen Faktoren für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage erläutert. Die technischen Faktoren bilden den Grundpfeiler jeder Kleinstwasserkraftanlage und sollten zur Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit an den Standort angepasst und optimiert werden.

5.2.1. Bedeutung der Auswahl des Turbinentyps

Die Wahl des Turbinentyps spielt eine entscheidende Rolle für die Kosten und Erträge der Kleinstwasserkraftanlage. In Kapitel 3 wurden die gängigsten Turbinentypen von Kleinstwasserkraftanlagen bereits mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen dargestellt. Der Turbinentyp richtet sich, wie bereits erläutert, insbesondere nach nutzbarer Fallhöhe und Durchfluss des Fließgewässers, in dem die Anlage platziert ist.

Bei Bau der Kleinstwasserkraftanlage werden die Umweltfaktoren so ausgelegt, dass diese am Turbineneinlass so konstant wie möglich bleiben. Die Turbine wird meist auf minimalen Durchfluss und Fallhöhe ausgelegt (Williamson, et al., 2019, pp. 11-12). In Abbildung 10-1 im Anhang ist ein Diagramm dargestellt, welches aufzeigt, welcher Turbinentyp bei welcher Fallhöhe und welchem Durchfluss am geeignetsten ist.

Das Diagramm in Abbildung 10-1 sollte jedoch nur zur groben Orientierung dienen. Weitere Faktoren spielen bei Wahl des Turbinentyps eine signifikante Rolle. Der Wirkungsgrad einer Turbine ist abhängig von der Beaufschlagung. In einer Effizienzkurve in Abbildung 5-2 ist dies für die Pelton-, Propeller-, Francis- und Durchströmturbine (Crossflow-turbine) zur Veranschaulichung dargestellt. Es werden die unterschiedlichen Einsatzbereiche der verschiedenen Turbinentypen deutlich. So zeigt sich zum Beispiel, dass Propellerturbinen nur bei einer gleichmäßigen und hohen Beaufschlagung effizient sind, während Pelton-Turbinen auch noch unter niedrigeren Beaufschlagungen einen hohen Wirkungsgrad aufzeigen. Die Schwankung der Beaufschlagungen ergibt sich aus den in Kapitel 5.1 erläuterten hydrologischen Verhältnissen.

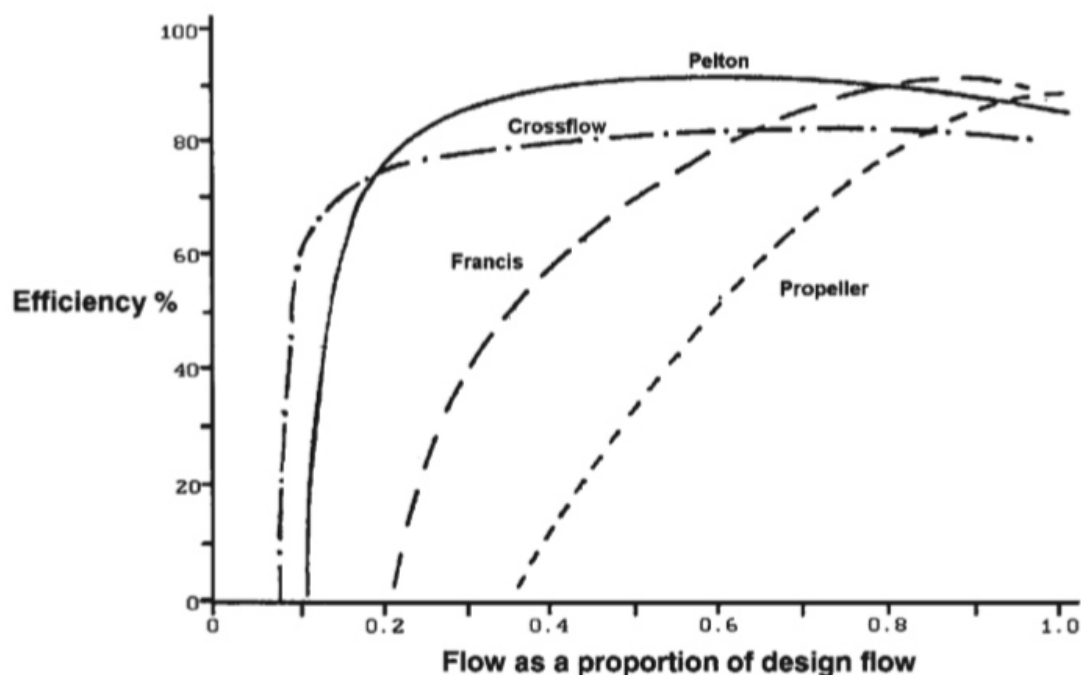


Abbildung 5-2: Wirkungsgrade von Turbinen nach Beaufschlagung (Paish, 2002, p. 36)

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Wahl des Turbinentyps ist die Konstruierbarkeit der Turbine. Eine lokale Herstellung ist je nach Komplexität der Turbine möglich, da die Manufaktur oft einfach zu lernen ist (Edeoja, et al., 2015, p. 24). Dies ermöglicht auch, die Turbine an die standortspezifischen Gegebenheiten anzupassen und findet daher in der Kleinstwasserkraft häufig Anwendung. Falls eine lokale Herstellung nicht möglich oder rentabel ist, sollte der Markt für Kleinstwasserkraftturbinen vor Ort analysiert und in Betracht gezogen werden.

Je nachdem ob die Turbine eigens hergestellt oder als Serienprodukt auf dem Markt gekauft wird, spielt auch die Transportierbarkeit eine Rolle. In ruralen Gebieten von Entwicklungsländern ist oft unzureichende bis keine Infrastruktur vorhanden, was den Transport insbesondere für größere Turbinen, wie z.B. die Tesla-Turbine, zum Plangebiet erschwert. Dies gilt insbesondere für Länder die überwiegend Hochgebirge aufweisen und deshalb nur schwer zu erschließen sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wahl der Turbine stark standortspezifisch ist und bei Planung einer Kleinstwasserkraftanlage gut abgewägt werden sollte. Folgende Faktoren spielen dabei nach Sangal et al. (2013, pp.425-426) die wichtigste Rolle und sollten bei der Wahl des Turbinentyps bekannt sein

- Komplexität der Konstruktion
- Kosten der Herstellung oder des Kaufs
- Wartungsfreundlichkeit
- Transportierbarkeit

5.2.2. Bedeutung der Auswahl des Generators

Die Bedeutung des Generators für ein Kleinstwasserkraftsystem spielt eine wichtige Rolle, das Thema soll in dieser Arbeit jedoch nur angeschnitten werden. Die Wahl des Generators einer Kleinstwasserkraftanlage hängt nach (Zainuddin, et al., 2019, p. 1930) von folgenden Parametern ab

- Gesamtleistung der Anlage
- Typ des Versorgungssystems und der elektrischen Last (Wechsel-/Gleichstrom)
- Verfügbare Kapazitäten auf dem Markt
- Kosteneffizienz des Generators

Da in ruralen Gebieten die zu versorgenden Haushalte oft weit voneinander entfernt liegen und Wechselstrom über größere Verteilersysteme effizienter ist, ist dies meist der präferierte Typ der elektrischen Last für Kleinstwasserkraftanlagen. Für den seltenen Fall, dass die Kleinstwasserkraftanlage hauptsächlich dazu gedacht ist, eine Batterie zu laden, bietet jedoch Gleichstrom die bessere Alternative (Zainuddin, et al., 2019, p. 1930). Dies ist jedoch in Entwicklungsländern aufgrund der hohen Kapitalkosten für eine Batterie nur selten der Fall. Für den Wechselstromfall werden meist Induktionsgeneratoren eingesetzt. Sie eignen sich gut für den Einsatz in ruralen Gebieten in Entwicklungsländern, da sie robust, zuverlässig und relativ kostengünstig sind (Maher & Smith, 2001, pp. 9.2-9.3). Trotzdem sind sie nicht die einzige Art von Generator, die für Kleinstwasserkraftanlagen genutzt wird. Abbildung 5-3 zeigt, mit deren Vor- und Nachteilen, eine Übersicht möglicher Generatoren für den Einsatz in Entwicklungsländern.

Type of Generator	Source	Typical Cost for 3kW Machine	Speed (rpm) Options	Disadvantages	Advantages
Induction	Standard industrial motor used as a generator	Low: \$200 - \$250	1000, 1500, 3000	Needs correctly sized capacitors connected to operate as a generator. Poor motor starting ability	Widely available, slow speed ranges, robust simple construction. Can withstand overspeed. Cheaper than synchronous generators
Synchronous - Brushed	Commonly used with petrol or diesel engines.	Low - medium: \$300 - \$500	3000, sometimes 1500	Brushes and slip rings wear out and require replacement. Must be strengthened for over-speeding	Higher efficiency than induction at part-load and better motor starting capability
Synchronous - Brushless	Occasionally used with diesel engines	High: \$600 - \$1000	1500, 3000	Not widely available. Repairs are often complex / expensive. Must be strengthened for over-speed	As synchronous-brushed but with better reliability
DC	Car or truck alternator	Not Applicable Max. output ≈ 500W	Car > 2000, truck > 1200	Not suitable for village electrification. Restricted range of appliances. Brushes and slip rings wear out	Very low cost, no controller required.

Abbildung 5-3: Generatoren für Kleinstwasserkraft (Maher & Smith, 2001, p. 9.3)

Zusammenfassend lässt sich für die Wahl des Generators sagen, dass erst geklärt werden muss, welche Art von Strom vorliegen soll, was maßgeblich davon abhängt, ob die Nutzung eines Batteriespeichers geplant ist. Weiterhin ist relevant, wie groß das Versorgungssystem ist bzw. wie weit die zu versorgenden Haushalte von Generator und voneinander entfernt sind. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, welche Generatoren auf dem Markt vor Ort zu welchen Kapazitäten verfügbar sind.

5.2.3. Technische Wartung, Haltung und Reparatur

Nach der Installation einer Kleinstwasserkraftanlage muss diese weiterhin gewartet, gehalten und ggf. repariert werden, was sich in den laufenden Kosten und im Arbeitsaufwand für die Nutzer der Anlage niederschlägt. Die Wartung einer Kleinstwasserkraftanlage muss in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden. Das Lao Institute for Renewable Energy (LIRE, 2008) führte in einem Bericht über Kleinstwasserkraftanlagen in Laos Interviews mit Bewohnern von Dörfern durch, in denen Kleinstwasserkraft Anwendung findet. Dabei stellte sich heraus, dass diese von den Anwohnern meist täglich kontrolliert und gesäubert werden. Das Säubern besteht aus dem Entfernen von Ästen, Abfällen oder Fischen, die sich in der Turbine angesammelt haben. In einigen Fällen wurden Netze vor der Turbine platziert, um die Beschädigung der Turbine durch zu viel Material zu verhindern. Weiterhin werden regelmäßige Untersuchungen der Kabel durchgeführt, da diese sehr fragil sind und oft ausgetauscht werden müssen.

Neben dem täglichen Säubern der Turbine entscheiden sich einige Verbraucher die Anlagen zu Zeiten, in denen kein Strom benötigt wird, aus dem Wasser zu entfernen. Auf diese Weise werden die anfälligen Teile der Anlage weniger stark abgenutzt und die Anzahl der Säuberungen kann reduziert werden.

Weiterhin kann durch Entfernen der Anlage das Risiko für Stromschläge, welche insbesondere bei schlechter oder falscher Verkabelung eine Gefahr darstellen, reduziert werden (siehe Kapitel 5.2.4). Bei Installation der Turbine sollte immer eine Möglichkeit generiert werden, welche ein Stoppen der Turbine ermöglicht. Das Lao Institute for Renewable Energy (LIRE, 2008) stellte in ihren Interviews fest, dass einige Nutzer von Kleinstwasserkraftanlagen die Turbinen per Hand stoppen, was ein hohes Risiko für Mensch und Turbine darstellt. Weiterhin sind Fälle bekannt, in denen die Turbine aus Gründen der Diebstahlsicherung entfernt oder mit einem Schloss geschützt werden. Manche interviewte Personen gaben an das System bei Ausfall der Anlage kurzzuschließen, um den Gang zur Anlage zu vermeiden. Dies stellt jedoch keine besonders sichere Methode dar und sollte wenn möglich vermieden werden. (LIRE, 2008, p. 30)

Für die Kosten der technischen Wartung, Haltung und Reparaturen der Anlage ist es entscheidend, ob diese von den Bewohnern der zu versorgenden Haushalte selbst oder von externen Fachmännern durchgeführt wird. Aus wirtschaftlicher Betrachtung sollte eine technische Schulung der Dorfbewohner stattfinden, welche spätestens nach Installation der Anlage abgeschlossen sein sollte. Die technische Wartung und Haltung von den Bewohner selbst sorgt für geringere Kosten. Bei einer Beschädigung der Anlage ist kein Fachmann externer Fachmann nötig, um diese zu reparieren. Dies erspart viele Kosten und ist für die Wirtschaftlichkeit der Anlage von Bedeutung. Auch kann die Anlage schneller repariert werden und die Zeit, in der die Anlage nicht in Betrieb ist, wird minimiert. Eine Schulung ist unkompliziert und kostengünstig und sollte anderen Alternativen immer vorgezogen werden (LIRE, 2008, p. 30). Die meisten technischen Probleme in Wartung, Haltung und Reparatur bezogen sich auf die anfälligen Teile wozu Wicklungen, Lager und Propeller gehören. (LIRE, 2008, p. 31)

5.2.4. Bedeutung des Kabelsystems

Die Verkabelung, welche benötigt wird, um den elektrischen Strom vom Generator zum Verbraucher zu bringen, spielt eine signifikante Rolle für die Gesamtkosten und die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Die Gesamtkabellängen können je nach Anzahl und Abständen der Verbraucher von 20 m bis zu 1,5 km reichen (LIRE, 2008, p. 24). Im letzteren Fall können die Kabelkosten leicht zu der teuersten Komponente des Systems werden. Diese Kosten können jedoch durch eine effiziente Planung und Wahl des richtigen Schemas minimiert werden. Dabei spielen folgende Faktoren nach (Maher & Smith, 2001, p. 14.3) eine Schlüsselrolle für die Verkabelung eines Kleinstwasserkraftsystems

- Direkte und indirekte Kosten
- Spannungsabfall
- Lebensdauer und Reliabilität
- Sicherheit

Die direkten Kosten für die Verkabelung sind sehr hoch und können, je nach Kabellänge, den größten Teil der Kapitalkosten für das System der Kleinstwasserkraftanlage stellen. Das Lao Institute for Renewable Energy (LIRE, 2008) stellten für das Entwicklungsland Laos die Kosten für eine Verkabelung verschiedener Längen auf und verglichen diese mit den Kosten von Turbinen verschieden installierter Leistungen. Je nach Länge der Kabel können diese die Kosten der Turbine überschreiten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

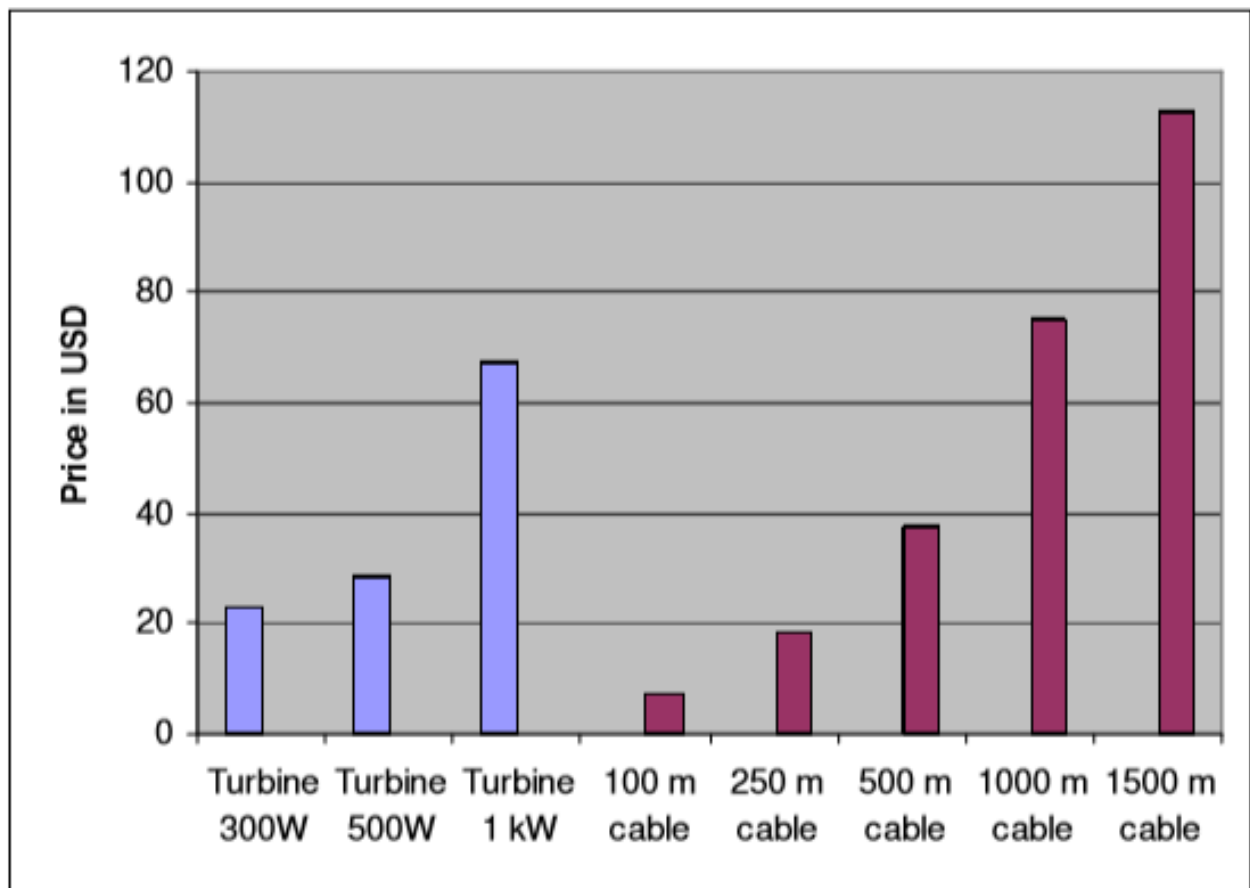


Abbildung 5-4: Gemittelte Investmentkosten für verschiedene Turbinen und Kabellängen (LIRE, 2008, p. 33)

Die indirekten Kosten spielen im Vergleich zu den direkten Kosten nur eine marginale Rolle. Das Lao Institute for Renewable Energy (LIRE, 2008) teilten die laufenden Kosten für verschieden installierte Leistungen in ihre Art (Kabel, Wicklungen, Lager, Turbine) ein und es wurde festgestellt, dass die Kabel hierbei nur einen geringen Anteil darstellen. Dies ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

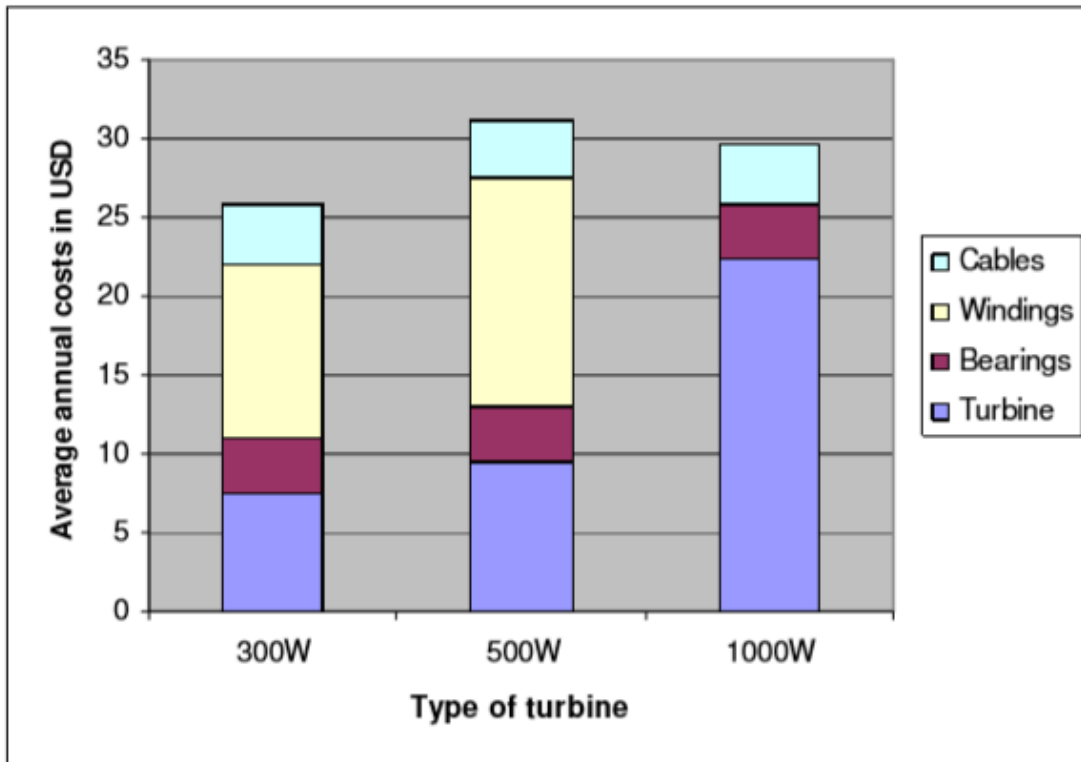


Abbildung 5-5: Gemittelte jährliche Kosten aufgeteilt nach Art für verschiedene Turbinentypen (LIRE, 2008, p. 34)

Aufgrund des Widerstands im Kabel findet über die Kabellänge ein Spannungsabfall statt, der minimiert werden sollte. Als Richtwert sollte hier ein maximaler Spannungsabfall vom Generator bis zum Kabelende von 10% angesetzt werden. Je länger und dünner die Kabel sind und desto schlechter deren Qualität ist, desto höher ist auch der Spannungsverlust beim Transport. (Maher & Smith, 2001, p. 14.1)

Die Lebensdauer von Kabeln ist relativ hoch und kann auf 10 Jahre angesetzt werden, was auch die geringen laufenden Kosten der Kabel erklärt (LIRE, 2008, p. 34). Es kann jedoch trotzdem zu Beschädigungen der Verkabelung kommen und Kabel müssen regelmäßig kontrolliert und ausgetauscht werden. Insbesondere oberirdische Verkabelung, die der Witterung ausgesetzt ist, benötigt häufig Reparaturarbeiten. Der Austausch von Kabeln ist jedoch einfach durchzuführen und benötigt keine weitgehende technische Expertise. Zu der Sicherheit sollte erwähnt werden, dass das Kabelsystem den gefährlichsten Teil des Energieversorgungssystems darstellt. Ohne das nötige Vorwissen werden Kabel oft ungeschützt verlegt und Mastkonstruktionen meist improvisiert installiert. Die Gefahr des Kabelsystems stellt oft ein Gegenargument zu Kleinstwasserkraft dar, daher sollte darauf besondere Rücksicht genommen werden. Kleinstwasserkraftsysteme können zu Unfällen oder sogar zu Todesfällen durch Stromschläge führen. Die Hauptgründe hierfür liegen im Unwissen über die Gefahr der Elektrizität und Unfällen mit frei liegenden Kabeln. (Smits, 2008, pp. 83-84)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verkabelung ein wichtiger technischer Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage ist. Dies zeigt sich insbesondere in den hohen direkten Kosten, während die indirekten Kosten nur eine marginale Rolle spielen. Der Spannungsabfall innerhalb der Kabel sollte minimiert werden und bei der Kabelwahl sollte auf eine ausreichende Lebensdauer der Kabel geachtet werden. Die Sicherheit der Verkabelung spielt eine wichtige Rolle für die Akzeptanz der Anlage und sollte nicht unbeachtet bleiben.

5.2.5. Manufaktur einer Kleinstwasserkraftanlage

Es existieren zwei Optionen zur Manufaktur von Kleinstwasserkraftanlagen. Entweder sie werden als serienmäßig produziertes Gut gekauft oder sie werden lokal hergestellt. Serienprodukte erlauben durch den Skaleneffekt eine Einsparung in den Herstellungskosten, aber bieten keine Möglichkeit das Design der Anlage an den Standort anzupassen. Weiterhin bietet eine lokale Manufaktur die Möglichkeit für lokale Betriebe, die notwendigen technische Fähigkeiten für den Bau, die Wartung und die Entwicklung der Turbinen außerhalb ihrer angegebenen Betriebsbereiche zu entwickeln, es werden lokale Jobs für die Gemeinden ermöglicht und lokale Reparaturen führen zu geringeren Kosten. Es ist jedoch schwer zu bewerkstelligen, dass die lokal hergestellten Anlagen die notwendige Qualität besitzen und es kann zu schlechten Leistungen oder verfrühten Versagen kommen. (Williamson, et al., 2019, p. 22)

Williamson et al. (2019, pp. 26-27) stellten weiterhin für die lokale Manufaktur von Kleinstwasserkraftanlagen folgende generalisierten Designregeln auf

- Bei der Manufaktur der Turbinen sollte einfaches Material benutzt werden (Blech-, Stangen-, Winkel- und Rohrabschnitte aus kaltgewalztem oder gezogenem Stahl)
- Die hergestellten Formen sollten einfach sein
- Herstellungsverfahren wie Biegen, Schweißen, Bohren und Gießen sollten nur angewendet werden, wenn dies erforderlich ist (es sollten nur grundlegende Werkzeuge benötigt werden)
- Die Größe der benötigten Komponenten sollte minimiert werden, damit die Manufaktur auch mit kleinen Maschinen durchgeführt werden kann
- Elektrische Komponenten sollten aus leicht verfügbaren Konstruktionen wie Induktions- oder Lichtmaschinen bezogen werden
- Spannvorrichtungen und -werkzeuge sollten genutzt werden, um die Genauigkeit bei der Konstruktion zu gewährleisten
- Die Konstruktion der Turbine sollte so skaliert werden, dass diese auch unter sich ändernden Umgebungsbedingungen genutzt werden kann
- Nach dem Bau sollte eine Anpassung des Systems weiterhin möglich sein

5.3. Geografie und Topografie

Das Wasserkraftpotential und damit auch die Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage ist stark von der Geografie und Topografie des Plangebietes abhängig. Da es sich bei der Kleinstwasserkraft ausschließlich um Laufwasserkraftwerke handelt, ist ein notwendiger Faktor das Vorhandensein von Flüssen oder Bächen in unmittelbarer Nähe des zu versorgenden Gebietes. In Kapitel 5.2.4 wurde bereits festgestellt, dass die Kapitalkosten einer Kleinstwasserkraftanlage stark von der Kabellänge abhängig sind. Eine Verlegung von Kabeln über längere Strecken würde dem Aufwand und den Kosten eines Anschlusses an das nationale Stromnetz gleichkommen, wodurch der Inselbetrieb sich nicht mehr rentieren würde. Zusätzlich sind Reparaturen und Wartungen einfacher durchzuführen, falls sich die Anlage und der Generator in unmittelbarer Nähe befinden. Insbesondere bei Ausfällen der Anlage in der Nacht, bietet dies einen großen Vorteil. Desto weiter ein für Kleinstwasserkraft nutzbares Fließgewässer vom zu versorgenden Gebiet entfernt ist, desto weniger lohnt sich die Investition in die Anlage.

Weiterhin spielt der Landschaftstypus eine wichtige Rolle. Wie aus Gleichung 2.2-3 ersichtlich wird, ist die Leistung einer Wasserkraftanlage linear von der nutzbaren Fallhöhe abhängig. Daher spielt es eine entscheidende Rolle, ob es sich bei dem Plangebiet um Flachland, Mittel- oder Hochgebirge handelt. Dies ist maßgebend für die Leistung der Anlage. Der Landschaftstypus spielt auch bei Wahl der Turbine eine entscheidende Rolle, wie bereits in Kapitel 5.2.1 erläutert wurde.

Zusätzlich ist zu beachten, wie die Zuwegung zum Plangebiet aussieht. Hochgebirge bieten ein höheres Potential für Wasserkraft, können jedoch auch zu einer Barriere aufgrund von Transportschwierigkeiten werden. Dörfer in hoch gelegenen Gebieten sind oft schwer erreichbar und es muss beachtet werden, wie die Anlage und die zugehörigen Materialien dorthin transportiert werden können. Ein Ausbau der Zuwegung kann notwendig werden, was sich wiederum in den Kosten niederschlagen wird.

5.4. Wirtschaftliche Faktoren

Für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage spielen die wirtschaftlichen Umgebungsfaktoren eine entscheidende Rolle. Eine Investition in eine Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland ist nur dann rentabel, wenn Faktoren wie Kosten, Verfügbarkeit und Marktsituation analysiert und aufeinander abgestimmt sind. In dieser Arbeit wird auf die Faktoren Kapital- und laufende Kosten, die Lasten, die Marktsituation und die Verfügbarkeit der Anlage eingegangen. Die wirtschaftlichen Faktoren der Elektrifizierung ruraler Gebiete mit erneuerbaren Energien ist ein umfassendes Thema, welches in dieser Arbeit nur oberflächlich behandelt werden kann.

5.4.1. Kapital- und laufende Kosten

Die Kosten für eine Wasserkraftanlage setzen sich aus den Kapital- und den laufenden Kosten zusammen. Die Kapitalkosten beinhaltet die Anschaffung und Installation aller notwendigen Komponenten. Die Kapitalkosten für Systeme, die an das Stromnetz angeschlossen sind, werden meist von den Anbietern übernommen. Netzunabhängige Systeme müssen jedoch von einzelnen Haushalten oder Gemeinden übernommen werden. Da die hohen Kapitalkosten von Haushalten in ruralen Gebieten in Entwicklungsländern meist nicht tragbar sind, ist die Einbindung eines Investors in Form einer finanziellen Institution oder einer Mikrokredit Organisation meist unabdingbar. Hierbei sollte von den Haushalten zuerst ein realistischer Rückzahlzeitraum festgelegt werden, welcher üblicherweise zwischen 3 und 15 Jahren liegt (Maher & Smith, 2001, p. 5.2). Falls keine anderen Daten zur Verfügung stehen, kann bei den Kapitalkosten grob von einer Summe von \$3000 pro installiertem kW ausgegangen werden (Maher & Smith, 2001, p. 5.1). Unter die laufenden Kosten fallen die Betriebs-, Reparatur- sowie die Wartungskosten. Diese variieren stark zwischen verschiedenen Ländern, hier kann aber grob eine Summe von \$30 - \$50 pro Monat angesetzt werden (Maher & Smith, 2001, p. 5.1). Eine andere Quelle setzt einen Betrag von \$74 - \$150 pro Jahr pro Haushalt an (Green, et al., 2005, p. 5).

Die Betriebskosten für eine Kleinstwasserkraftanlage können stark schwanken. Im folgendem ist eine Abbildung gegeben, welche die Betriebskosten für Kleinstwasserkraftanlagen in Laos darstellt. Diese variieren je nach installierter Leistung der Anlage. Ein entscheidender Faktor ist auch, ob die laufenden Kosten der Beleuchtung in die Berechnung miteinfließen. Da aufgrund der hohen Kosten häufig auf einen Spannungsregler verzichtet wird, kommt es zu unregelmäßigen Spannungen, welche die Beleuchtung stark belastet und dazu führt, dass diese häufig ersetzt werden muss. (LIRE, 2008, p. 34)

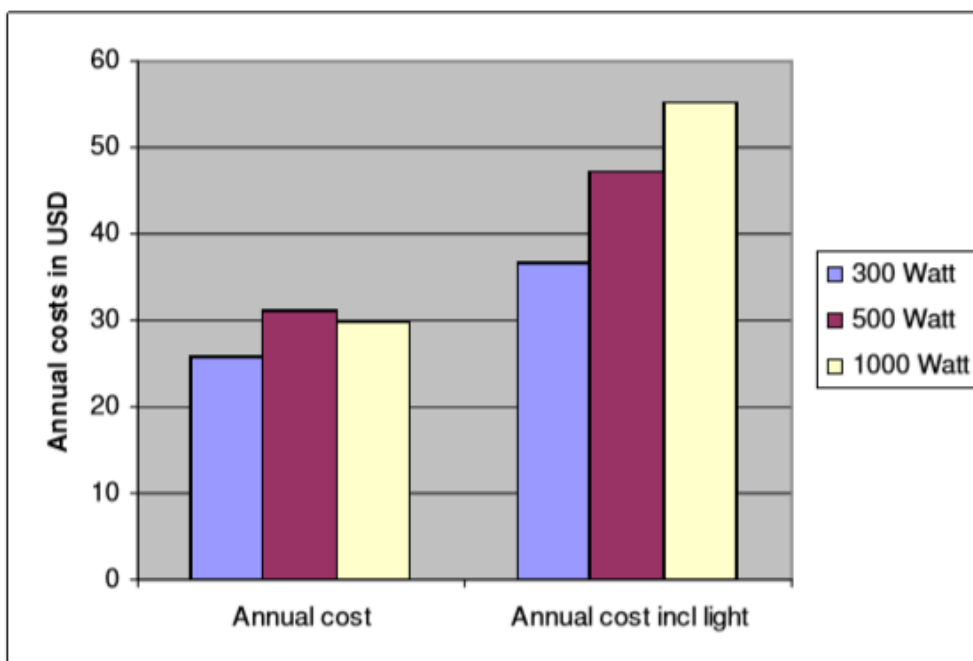


Abbildung 5-6: Laufende Kosten von Kleinstwasserkraftanlagen in Laos mit und ohne Kosten der Beleuchtung (LIRE, 2008, p. 34)

Die Stromgestehungskosten für Wasserkraft sind im Allgemeinen sehr gering, wobei diese auch sehr standortspezifisch sind. Generell gilt, dass die Stromgestehungskosten einer Anlage steigen, je kleiner die installierte Leistung ist. Für größere Wasserkraftanlagen lässt sich ein Intervall zwischen \$0,02-0,19/kWh feststellen, während es bei Kleinstwasserkraftanlagen bis zu \$0,27/kWh oder mehr kommen kann. (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2012, p. i)

In Abbildung 10-2 im Anhang sind die Stromgestehungskosten für verschiedene Energieerzeugungsträger aufgezeigt. Auch hier zeigt sich, dass diese für Kleinstwasserkraftanlagen sehr gering sind. Bei Betrachtung der Abbildung sollte jedoch immer beachtet werden, dass diese zeitgebunden sind. Die Technologie und die Preise sind nicht statisch und können sich mit fortschreitender Entwicklung ändern.

5.4.2. Zusätzlich angebrachte Lasten

Der Schlüssel zum Erreichen eines wirtschaftlichen und nachhaltigen Energiesystems besteht darin, sicherzustellen, dass nicht nur Haushaltslasten im System vorhanden sind, sondern auch solche Lasten, die ein Einkommen generieren können. In der Kleinstwasserkraft und anderen netzfernen Systemen kann dies erreicht werden, indem Geräte mit Strom versorgt werden, die einen Mehrwert für lokal produzierte Rohstoffe bieten, wozu z.B. landwirtschaftlich genutzte Geräte oder Werkstätten gehören können. Diese Geräte können die Effizienz der Arbeitspraktiken verbessern und somit zusätzliches Einkommen generieren oder mehr Zeit für die Gemeinschaft erzielen, die für andere Aktivitäten genutzt werden kann. In einer Studie mit 24 Kleinstwasserkraftsystemen in Nepal wurden technische, soziale und wirtschaftliche Erfolgs- und Misserfolgspunkte innerhalb der Systeme bewertet. Es wurden mehrere Schlüsselparmeter für den Erfolg eines Projekts ermittelt, z. B. die Anzahl der vom System zugeführten industriellen und gewerblichen Lasten, die Wartungsqualität und der Einsatz geschulter Bediener. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor war die Anzahl der Industrielasten, die vom System unterstützt wurden, da dies zusätzliches Einkommen verschaffte und den Kapazitätsfaktor erhöhen konnte. (Butchers, et al., 2019, p. 453)

Die mechanische Energie der Turbine kann direkt für mechanische Geräte, wie z.B. eine Getreidemühle verwendet werden, so werden Verluste im Generator umgangen. Der Generator kann dabei parallel angeschlossen sein. Jedoch sind die Kapazitäten von Kleinstwasserkraftanlagen meist zu gering, um neben dem häuslichen Gebrauch weitere Lasten anzuschließen, die Einkommen erzeugen können. Da sich die meisten Kleinstwasserkraftanlagen im Bereich von 200 – 1000 W befinden, werden diese meist ausschließlich für häuslichen Gebrauch eingesetzt. (Williamson, et al., 2019, pp. 17-18)

5.4.3. Aktuelle Marktsituation

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist es von Bedeutung, die Situation des Marktes für Kleinstwasserkraftanlagen vor Ort zu kennen, welche in den jeweiligen Schwellen- und Entwicklungsländern sehr unterschiedlich sein kann. Der größte Markt für Kleinstwasserkraftanlagen befindet sich in Südostasien in den Ländern China, Vietnam und Nepal. Die Leistungen der Anlagen liegen im Bereich von 200 W bis 3 kW und es handelt sich größtenteils um Anlagen mit einem Einsatzbereich von kleinen bis mittleren Fallhöhen. In Abbildung 5-7 sind exemplarisch Kosten für verschiedene Kleinstwasserkraftanlagen in China, Vietnam und Nepal aufgezeigt. (Green, et al., 2005, pp. 11-15)

Cost	Low-head PH (China)	Low-head PH (Vietnam)	High-head Peltric (Nepal)
Capacity	300 W (actually 100 W)	200 W	1,000–3,000 W
Turbine	\$15–20	\$50–\$150	\$1,000–\$3,000
Civil works	\$20 (but often very minimal)	\$100–\$200	Site variable
Transmission line	\$20–100	\$20–\$100	Site variable
Household electrical system	\$10–50	\$10–\$50	\$10–50
Engineering support	-NA-	\$200	Site variable
TOTAL	\$65–\$190	\$380–\$700	\$2,000–\$6,000
Cost/kW	\$650–\$1,900	\$1,900–\$3,500	\$2,000

Abbildung 5-7: Kostenstruktur für verschiedene Formen von Kleinstwasserkraftanlagen (Green, et al., 2005, p. 14)

Anlagen aus China sind sehr kostengünstig, haben sich jedoch zu großen Teilen als ineffizient und unzuverlässig erwiesen. Oft haben die Anlage nur eine Lebensdauer von bis zu 2 Jahren. In Südamerika konnte sich auch bereits ein kleiner Markt für Kleinstwasserkraftanlagen, insbesondere im geringen Fallhöhenbereich etablieren, während sich in Afrika noch kein Markt etablieren konnte. Mit über 120.000 installierten Anlagen befindet sich der größte Markt für Kleinstwasserkraftanlagen in Vietnam. (Green, et al., 2005, pp. 11-15)

5.5. Politische Faktoren

Für die Elektrifizierung ruraler Gebiete in Entwicklungsländern stellen die politischen Rahmenbedingungen einen wichtigen Grundstein dar. Jedoch herrscht häufig eine mangelnde Abgrenzung der Zuständigkeiten zwischen den verschiedenen Behörden und schwache Kapazitäten bei den entsprechenden Institutionen. Hindernisse der Elektrifizierung ruraler Gebiete in Entwicklungsländern beinhalten unzureichende politische Maßnahmen, schwache institutionelle Rahmenbedingungen und begrenzte Finanzierungen. Regierungen in Entwicklungsländern haben jedoch Bemühungen unterschiedlicher Art in den Bereichen der politischen Maßnahmen und der Finanzierung gemacht, um eine Elektrifizierung ihrer Länder voranzutreiben (Haanyika, 2005, pp. 2977-78).

5.5.1. Regierungsmaßnahmen

Kleinstwasserkraftanlagen befinden sich zum Großteil in Gemeinschafts- oder Unternehmensbesitz, Besitz von Regierungen sind nicht weit verbreitet (Maher & Smith, 2001, p. 5.1). Dennoch können Regierungen eine wichtige Rolle in der Elektrifizierung von ruralen Gebieten durch Kleinstwasserkraftanlagen spielen. Es existieren unterschiedliche finanzielle Anreize, welche von den Regierungen ausgeübt werden können. Es können Subventionen von privaten Unternehmen für die Anfangsphase der ersten zehn Jahre des Investments sichergestellt werden. Weiterhin können die Regierungen die Investoren mit überzeugenderen und schnelleren Prozessen und besserem Zugriff auf Bankdarlehen versorgen, so dass diese ihre eigenen Kleinstwasserkraftprojekte entwickeln oder Ausschreibungen von Regierungen oder anderen internationalen Organisationen/Unternehmen durchführen können. Eine dritte Möglichkeit ist, dass Regierungen für lokale private Unternehmen, welche in öffentlich-private Partnerschaften involviert sind, den Zugang zu Finanzmitteln für Investitionen erleichtern. Richtlinien für erneuerbare Energien und rurale Elektrifizierung sollte die Unterstützung von Investments in Kleinstwasserkraftanlagen und das Involvieren von ausländischen und heimischen privaten Unternehmen im ruralen Energiesektor beinhalten. Tarifverträge für netzunabhängige Kleinstwasserkraftprojekte sollten dieselben oder billiger sein als netzangeschlossene. Derzeit sind die Tarife für Netzstrom erheblich niedriger, was zu einer Abhängigkeit von dieser Energiequelle führt und gleichzeitig den Wettbewerb auf dem Strommarkt beeinträchtigt. Die Anpassung der Hauptnetztarife in dem Maße, dass sie nicht niedriger als die netzfernen Tarife sind, erleichtert insbesondere die Akzeptanz von netzfernen Projekten für die Nutzer. In der Zwischenzeit wird es das Interesse privater Investoren wecken, mehr in den netzfernen Sektor zu investieren, da es finanziell attraktiver wird. (Bounthongvongsaly, et al., 2010, pp. 3-5)

Zuschüsse und Subventionen für die Elektrifizierung von ruralen Gebieten kann von Regierungen kommen. Als Beispiel ist in Tabelle 5-1 die Subvention von Kleinstwasserkraftanlagen in Nepal dargestellt.

Tabelle 5-1: Subventionen von Kleinstwasserkraft in Nepal, erstellt nach (Ministry of Population and Environment, 2016, p. 6)

Subsidy Category	Capacity	Subsidy Amount in Nepalese Rupee		
		Category „A“ Regions	Category „B“ Regions	Category „C“ Regions
Distribution (per HH)	Up to 10 kW	11.500	10.500	10.000
Generation (per kW)	Less than 5 kW	70.000	60.000	50.000
	5kW to 10 kW	95.000	85.000	75.000

Ein Grund, welcher der politischen Förderung von Kleinstwasserkraft im Weg steht, ist der Sicherheitsaspekt. Wie bereits in 5.2.4 erwähnt, geht insbesondere vom Kabelsystem eine Gefahr für die Sicherheit der Verbraucher aus. Smits (2008) führte Interviews in Laos durch, in denen der Leiter der Abteilung für ländliche Elektrifizierung des Ministeriums sagt, dass Kleinstwasserkraft nicht gefördert wird, weil diese nicht sicher ist. Ein ähnliches Statement wurde vom Energieberater der World Bank abgegeben. Durch die schlechte Datenlage in den Entwicklungsländern ist es nicht möglich Informationen dazu bekommen, wie wahr diese Aussagen sind. Die Risiken, die von Kleinstwasserkraftanlagen ausgehen sind real, die Installation und Wartung der Kabel ist der gefährlichste Teil und Unfälle haben einige Todesfälle verursacht. Laut Smits (2008) ist dies jedoch häufig überzogen und sollte nicht zu einem Gegenargument zur Kleinstwasserkraft werden. (Smits, 2008, pp. 81-82)

5.5.2. Politische Risiken

Die International Hydropower Association (2019) hat ein Protokoll erstellt, welches eine Nachhaltigkeitsbewertung der Entwicklung und des Betriebs von Wasserkraftprojekten liefern soll. Ein wichtiger politischer Faktor dieses Protokolls, der bei der Investition in eine Kleinstwasserkraftanlage beachtet werden sollte, sind die politischen Risiken. Diese sind definiert als das Risiko eines finanziellen Verlusts oder der Unfähigkeit, Geschäfte von Investoren, Unternehmen und Regierungen zu tätigen. Dies kann aufgrund von Änderungen der Regierungspolitik, Maßnahmen der Regierung zur Verhinderung des Eindringens von Waren, Enteignung oder Beschlagnahme von Waren, Währungsinkonvertierbarkeit, politisch motivierten Eingriffen, Instabilität der Regierung oder Krieg hervorgerufen werden. Die meisten politischen Risiken bilden grenzüberschreitende Probleme und treten in Entwicklungsländern vermehrt und verschieden stark auf. Das Ziel sollte es sein, vor Investition in eine Kleinstwasserkraftanlage die politischen Risiken eines Plangebietes zu identifizieren, einzuschätzen und zu managen. Die politischen Risiken in einem Entwicklungsland können z.B. durch folgende Parameter abgeschätzt werden: Energiesektorreformen, die Solidität der Haushaltsführung, grenzüberschreitende Vereinbarungen und Antikorruptionsstrategien. Um die politischen Risiken zu minimieren können folgende Maßnahmen vor Investition in eine Kleinstwasserkraftanlage sinnvoll sein: Beurteilung der politischen Stabilität der Regierung, Treffen mit Repräsentanten der Regierung, Treffen mit grenzüberschreitenden Institutionen und anderen wichtigen Interessengruppen. (International Hydropower Association, 2019, p. 26)

5.6. Partizipation der Kommune

Ein wichtiger Faktor für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland ist das Maß der Partizipation in Planung, Installation und Instandhaltung der Anlage. Diese Art der Partizipation ist bei Kleinstwasserkraftanlagen möglich, was nicht bei allen Energieträgern der Fall ist. Die Partizipation der Kommune führt insbesondere zu zwei Vorteilen: den geringeren Kosten für Bau und Installation sowie das Entstehen von mehr Bewusstsein für Wartung und Haltung der Anlage (Lahimer, et al., 2012, p. 5869).

Sanchez-Campos (2006) führte eine Studie durch, in der die Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Elektrifizierung von ruralen Gebieten in Peru identifiziert und analysiert wurde. Es wurden Untersuchungen über die etwas größeren Mikrowasserkraftwerke durchgeführt, die Schlussfolgerungen lassen sich aber auf Kleinstwasserkraftwerke übertragen. Dabei wurde herausgefunden, dass bei Mikrowasserkraftanlagen generell eine höhere Partizipation bei Bau und Installation der Anlage herrscht als bei Diesel-Generatoren. Bei Mikrowasserkraftanlagen kann die Partizipation in Form von Bauarbeiten und dem Fällen von Entscheidungen stattfinden, wohingegen sich bei Dieselgeneratoren die Partizipation nur auf letzteres beschränkt. Weiterhin wurde festgestellt, dass bei Mikrowasserkraftanlagen im Allgemeinen eine gute Partizipation in Wartung und Instandhaltung der Anlage herrscht, welche bei Dieselgeneratoren nicht existieren. Der Hauptgrund hierfür ist, dass Wasserkraftanlagen sehr viel weniger qualifizierte Fähigkeiten erfordern, die von den Benutzern bereitgestellt werden können, im Allgemeinen handelt es sich dabei um Bauarbeiten. Dahingegen erfordern Dieselgeneratoren Fähigkeiten, die in ländlichen Gemeinden nicht vorhanden sind. (Sanchez-Campos, 2006, pp. 182-3)

Es hat sich gezeigt, dass in Dörfern mit Mikrowasserkraftanlagen die Betroffenen stärker bereit sind sich zu beteiligen als in Dörfern mit Dieselgeneratoren. Es wurde festgestellt, dass die kommunale Partizipation ein wichtiger Faktor für den erfolgreichen Einsatz einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland ist. Partizipation in Planung, Installation und Erhaltung und Wartung der Anlage ist eine hilfreiche Praxis, um gute Beziehungen zwischen den Planern und den Nutzern der Anlage zu erhalten. Weiterhin kann es die finanzielle Zusammenarbeit, z.B. bei der sofortigen Zahlung von Rechnungen, verbessern. Daher sollte vor Investition in eine Kleinstwasserkraftanlage festgestellt werden, inwieweit eine Partizipation der zu versorgenden Kommune in das Projekt möglich ist.

6. Checkliste für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen, wird im Folgendem eine Checkliste für Investoren erstellt, welche es ermöglicht die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Entwicklungsland grob abzuschätzen. Dabei wird sich ausschließlich auf die in Kapitel 5 erläuterten Faktoren bezogen. Diese Liste ist allgemein gehalten und je nach lokalen Besonderheiten ggf. zu ergänzen.

Fragestellung	Checkbox	Kommentare
Hydrologische Aspekte		
1. Steht eine Datenlage zu den hydrologischen Verhältnissen des Plangebiets zu Verfügung?	<input type="checkbox"/>	
2. Basiert diese Datenlage auf einem Zeitraum von 10-25 Jahren?	<input type="checkbox"/>	
3. Wurde der Einfluss des Klimawandels auf die zukünftigen hydrologischen Verhältnisse berücksichtigt?	<input type="checkbox"/>	
Technische Aspekte		
4. Wurde die Wahl des Turbinentyps an das Plangebiet angepasst?	<input type="checkbox"/>	
5. Wurde die Wahl des Generators an das Plangebiet angepasst?	<input type="checkbox"/>	
6. Wurden die Kosten und der Aufwand für die technische Wartung, Haltung und Reparatur der Anlage abgewägt und berücksichtigt?	<input type="checkbox"/>	
7. Hat eine technische Schulung der Nutzer der Kleinstwasserkraftanlage stattgefunden, damit diese Wartung, Haltung und Reparatur selber durchführen können?	<input type="checkbox"/>	
8. Ist die Gesamtkabellänge und die damit verbundenen Kosten bekannt?	<input type="checkbox"/>	
9. Wurden Gefahren des Kabelsystems identifiziert und minimiert?	<input type="checkbox"/>	

Wirtschaftliche Aspekte

10. Wurden die Kapital- und die laufenden Kosten abgeschätzt?	<input type="checkbox"/>	
11. Ist eine lokale Manufaktur der Anlage möglich und sinnvoll?	<input type="checkbox"/>	
12. Ist die Marktsituation von Kleinstwasserkraftanlagen vor Ort bekannt?	<input type="checkbox"/>	
13. Werden gewerbliche Lasten an das System angeschlossen?	<input type="checkbox"/>	
14. Ist die jährliche Verfügbarkeitsdauer der Anlage bekannt?	<input type="checkbox"/>	

Geographische und Topographische Aspekte

15. Sind die geographischen Gegebenheiten des Plangebiets bekannt?	<input type="checkbox"/>	
16. Ist der Transport der Anlage zum Plangebiet sichergestellt?	<input type="checkbox"/>	

Politische Aspekte

17. Existieren Regierungsmaßnahmen zur Förderung von erneuerbaren Energieprojekten?	<input type="checkbox"/>	
18. Wurden die politischen Risiken abgewägt?	<input type="checkbox"/>	

Partizipative Aspekte

19. Ist die Kommune ausreichend in das Projekt partizipiert?	<input type="checkbox"/>	
--	--------------------------	--

7. Zukunftsausblick der Kleinstwasserkraft

Wie könnte die Nutzung von Kleinstwasserkraftanlagen in Schwellen- und Entwicklungsländern in Zukunft aussehen? Mit zunehmender Globalisierung werden technische Geräte wie Mobiltelefone oder Fernsehgeräte auch für Menschen in armen und ländlichen Gebieten zugänglich und finanziell tragbarer. Dies wird zu einem Anstieg der Nachfrage technischer Geräte führen und somit auch zu einer größeren Nachfrage nach Elektrifizierung. Es werden in Zukunft große Anstrengungen erforderlich sein, um die Elektrifizierung in armen und ländlichen Gebieten mittels erneuerbaren Energien voranzutreiben.

Die Kleinstwasserkraft ist bereits ein ausgereifter Energieträger und aus technologischer Sicht ist es unwahrscheinlich, dass sich dieser in den nächsten Jahren wesentlich weiterentwickeln wird. Jedoch hat die rasche Weiterentwicklung anderer Technologien wie der Computersoftware neue Möglichkeiten für die Optimierung von Kleinstwasserkraftanlagen ermöglicht. So haben z.B. Analysen von rechnergestützten Fluidodynamiken, Entwicklern geholfen, die Effizienz und die Leistung von Kleinstwasserkraftturbinen zu verbessern und sie gegenüber anderen netzunabhängigen Energieträgern effizienter und kostengünstiger zu gestalten (Lahimer, et al., 2012, p. 5872). Trotz dessen hängt die Zukunft der Kleinstwasserkraft nicht von technischen, sondern von ökonomischen und politischen Faktoren ab.

Die Entstehung des Marktes für Kleinstwasserkraftanlagen fand in den späten 80ern in Südchina statt und konnte sich dort und in den umliegenden Ländern stark weiterentwickeln. Die Domäne des Marktes für Kleinstwasserkraftanlagen befindet sich daher in Südostasien. Nach Green et al. (2005, p. 3) existiert jedoch in anderen Schwellen- und Entwicklungsländern in Latein- und Südamerika, im subsaharischen Afrika und im indischen Subkontinent ein hohes Potential für den Markt der Kleinstwasserkraft. Nach Maraiyappan et al. (2004, p. 30) besteht ein Markt für vier Millionen Kleinstwasserkraftanlagen. Nach Lahimer et al. (2012, p. 5874) ist dieser sogar noch größer, wenn traditionelle Wassermühlen durch Kleinstwasserkraftanlagen ersetzt werden.

Das Wachstum in den noch nicht erschlossenen Regionen wird in erster Linie von Regierungsmaßnahmen bestimmt sein. Wenn es um das Bewusstsein für erneuerbare Energien geht, ist jedoch die Rolle der Regierung in Industrieländern effektiver und umsetzbarer als in weniger entwickelten Ländern. Jede Regierung kann jedoch einen wesentlichen Beitrag zur Nachfragegenerierung von Kleinstwasserkraft auf dem Elektrizitätsmarkt leisten. Maßnahmen können z.B. eine Ermutigung des Privatsektors, in Stromerzeugung aus Kleinstwasserkraft zu investieren oder eine Förderung von Programmen für erneuerbare Energien durch besondere Finanzierungsmechanismen sein. Wenn die Regierungen diese Umriss als ihre Verpflichtungen betrachten, werden Kleinwasserkraftanlagen auf der ganzen Welt wirtschaftlich rentabel, insbesondere für die ländliche Elektrifizierung. (Lahimer, et al., 2012, pp. 5873-5874)

Nach Lahimer et al. (2012, p. 5872) sieht die Kleinstwasserkraft einer guten Zukunft entgegen. Es hat sich als die günstigste Form der netzunabhängigen Stromversorgung mit erneuerbaren Energien erwiesen. Selbst wenn andere erneuerbare Energieträger sich technologisch weiterentwickeln werden, bleibt die Kleinstwasserkraft die beste Option für Gebiete, deren Lage die Nutzung erlaubt. Die Zukunft der Kleinstwasserkraft wird von Politik und Investitionen abhängen.

8. Fazit

Es hat sich gezeigt, dass die Kleinstwasserkraft eine valide Energiequelle für die arme Landbevölkerung in Schwellen- und Entwicklungsländern ist, die noch viel ungenutztes Potential aufweist. Kleinstwasserkraft ist ein erneuerbarer Energieträger, den die Menschen selbst kaufen, herstellen, installieren und warten können. Insbesondere Länder mit einer gebirgigen Topografie und hohem Niederschlag weisen ein großes Potential für die Kleinstwasserkraft auf. Viele der am häufigsten genannten Kritikpunkte an Wasserkraftanlagen treffen auf die Kleinstwasserkraft nicht zu, da sich die ökologischen und sozialen Folgen in Grenzen halten. Es hat sich gezeigt, dass Kleinstwasserkraftanlagen auch im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energieträgern eine gute Alternative anbieten. Dennoch erfordert die Situation der Kleinstwasserkraftanlagen eine weitere Verbesserung in Bezug auf Zuverlässigkeit, Effizienz und Sicherheit. Die Verbesserung des Zugangs zu dieser Technologie kann erreicht werden durch:

- die Ausweitung der Investitionen für netzunabhängige Elektrifizierungsprojekte, die von Regierung, Gebern und dem privaten Sektor bereitgestellt werden
- die Verbesserung der bestehenden Marktsituation, um die Zuverlässigkeit und Effizienz der Anlagen zu verbessern und zu sichern
- die Sensibilisierung für Kleinstwasserkraft und ihre Bedeutung für die Anhebung des Lebensstandards auf dem Land, um die Akzeptanz und Nachfrage nach der Technologie zu erhöhen
- die Zunahme des gemeinschaftsbasierten Austauschs von Kleinstwasserkraftsystemen
- die Formulierung einer geeigneten Regierungspolitik sowie eines soliden Finanzrahmens zur Stimulierung in- und ausländischer Investitionen in Kleinstwasserkraft.

Weitergehende Forschung könnte sich mit der Frage beschäftigen, wie sich ein Batteriespeicher auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirkt. Diese ist mit höheren Kosten verbunden, sorgt jedoch dafür, dass die Stromversorgung keinen Schwankungen mehr unterliegt und es kann auch bei Ausfällen der Anlage noch eine Versorgung mit Strom gewährleistet werden kann. Weiterhin könnte auf die rechtlichen Faktoren eingegangen werden, die bei Planung, Installation und Haltung von Kleinstwasserkraftanlagen eine Rolle spielen. Diese unterscheiden sich stark danach, in welchem Entwicklungsland die Anlage geplant wird. Weiterhin könnte die Nachhaltigkeit von Kleinstwasserkraftanlagen, z.B. mithilfe von Ökobilanzierungen, über einen längeren Zeitraum untersucht werden. Insbesondere im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern kann dies von Interesse sein.

9. Literaturverzeichnis

- Anup, K., Poudel, G., Poudel, S., & Khadka, M. (2010). Hydro Home System - an inventory on rural electrification. (S. 338-341). Singapur: International Conference on Computer and Automation Engineering.
- Barnes, D. F. (21. Juli 2011). Effective solutions for rural electrification in developing countries: Lessons from successful programs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, S. 3:260 - 264.
- Bhattaraia, B. P., & Joshi, C. B. (2011). Economic Sustainability of Peltric System, A case Study in Nepal. Stanford University: Conference of Stanford University, California, USA.
- Border Green Energy Team. (2006). *Huai Kra Thing micro-hydro project*. Greacen C. Project report.
- Bounthongvongsaly, T., Susanto, J., M. Smits, Nanthavong, K., & Gaillard, L. (2010). *Policy Brief on Pico Hydropower*. Vientiane: Lao Institute for Renewable Energy (LIRE), ETC (Pico Hydropower Innovation and Capacity Building Program Phase 2) .
- Brian, T., Jordan, B., & McGhee, R. (2013). *Pico-Hydropower Franchising: A Test Bed in Rural Honduras*. Waco, Texas: National Collegiate Inventors and Innovators Alliance.
- Butchers, J., Williamson, S., Booker, J., Tran, A., Gautam, B., & Karki, P. B. (2019). A study of technical, economic and social factors affecting micro-hydropower plants in Nepal. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC 2018)* (S. 446-453). San Jose: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Chuenchooklin, S. (2006). Development of Pico-hydropower Plant for Farming Village in Upstream Watershed, Thailand. Bonn: Tropentag.
- Desai, A., Mukhopadhyay, I., & Ray, A. (2014). Theoretical analysis of a Pico-hydro power system for energy generation in rural or isolated area. *Power and Energy Engineering Conference, IEEE PES Asia-Pacific*.
- Edeoja, A., Ibrahim, S., & Kucha, E. (Mai 2015). Suitability of Pico-Hydropower Technology For Addressing The Nigerian Energy Crisis – A Review . *International Journal of Engineering Inventions* , S. 17-40.
- Elbatran, A. H., Abdel-Hameda, M. W., Yaakobb, O. B., Ahmed, Y. M., & Ismailb, M. A. (15. Mai 2015). Hydro Power and Turbine Systems Reviews. *Jurnal Teknologi*, S. 83-90.
- Energy for Life. (2011). *Energy for Life*. Abgerufen am 17. April 2020 von http://www.energie-ist-entwicklung.de/download/E4L_BR_Poudasa_do_Parque.pdf
- ESMAP. (2007). *Technical and Economic Assessment of Off-grid, Mini-grid and Grid Electrification Technologies*. Washington DC: The World Bank Group.
- Fraenkel, P., Paish, O., Bokalders, V., Harvey, A., Brown, A., & Edwards, R. (1991). *Micro-hydro power : A guide for development workers*. London: Immediate Technology Publications in association with the Stockholm Environment Institute.
- Giesecke, J., Heimerl, S., & Mosonyi, E. (2014). *Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb* (6. Auflage Ausg.). Berlin: Springer Verlag.
- Global Hydro. (2020). Abgerufen am 31. 05 2020 von <http://www.global-hydro.eu/de/produkt/francis-turbine>

- Global Network on Energy for Sustainable Development. (2007). *Renewable energy technologies and poverty alleviation: overcoming barriers and unlocking potentials*.
- Green, J., Fuentes, M., Rai, K., & Taylor, S. (2005). *Stimulating the Picohydropower Market for Low-Income Households in Ecuador*. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development/THE WORLD BANK.
- Haanyika, C. M. (5. Juli 2005). Rural electrification policy and institutional linkages. *Energy Policy* 34, S. 2977 - 2993.
- HomeConstructor. (2020). Abgerufen am 31. 05 2020 von <https://www.homeconstructor.net/de/eigenbau-einer-tesla-turbine>
- International Hydropower Association. (2019). *Hydropower Sustainability Assessment Protocol*. London: International Hydropower Association.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2012). *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series*. Bonn: IRENA 2012.
- Kaplan Inc. (2020). Abgerufen am 31. 05 2020 von <https://kaplanincag.jimdofree.com/>
- Koukouvinis, P. K., Anagnostopoulos, J. S., & Papantonis, D. E. (2011). SPH Method used for Flow Predictions at a Turgo Impulse Turbine: Comparison with Fluent. *Engineering and Technology*, S. 659-666.
- Lahimer, A., Alghoul, M., Sopian, K., Amin, N., Asim, N., & Fadhel, M. (9. August 2012). Research and development aspects of pico-hydro power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, S. 5861 - 5878.
- LIRE. (2008). *Technography of pico-hydropower in the Lao PDR*. Vientiane: LIRE.
- Maher, P., & Smith, N. (2001). *Pico Hydro for Village Power*. Nottingham: Micro Hydro Research Group.
- Maher, P., Smith, N., & Williams, A. (Dezember 2003). Assessment of pico hydro as an option for off-grid electrification in Kenya. *Renewable Energy* 28(9), S. 1357 - 1369.
- Maraiyappan, J., Taylor, S., Church, J., & Green, J. (2004). *A Guide to CDM and Family Hydropower*. Chineham: IT Power.
- Meier, T., & Fischer, G. (2011). *Assessment of the Pico and Micro-Hydropower Market in Rwanda*. Nairobi: GVEP International – Africa Regional Office.
- Ministry of Population and Environment. (2016). *Renewable Energy Subsidy Policy, 2073 BS*. Kathmandu (Nepal): Government of Nepal.
- Neromylos. (2020). Abgerufen am 31. 05 2020 von <https://www.neromylos.com/durchstroemturbine/>
- Paish, O. (Februar 2002). Micro-hydropower: status and prospects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216(1), S. 31-40.
- Pascalea, A., Urmeea, T., & Mooreb, A. (18. Mai 2011). Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand. *Renewable Energy: An International Journal*, S. 2799 - 2808.
- REN21. (2017). *Global Status Report 2017*. Paris: REN21 Secretariat.
- Roth Pump Company. (2020). Abgerufen am 31. 05 2020 von <https://www.rothpump.com/end-mounted-industrial-pumps.html>

-
- Sanchez-Campos, T. (2006). *Key Factors for the Implementation of Successful, Stand-Alone Village Electrification Schemes in Peru*. Ann Arbor: ProQuest LLC.
- Sangal, S., Garg, A., & Kumar, D. (März 2013). Review of Optimal Selection of Turbines for Hydroelectric Projects . *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* , S. 424 - 430.
- Smits, M. (2008). *Neglected decentralized rural electricity production in the Lao PDR*. Wageningen: Wageningen University.
- The World Bank Group. (2018). *Access to electricity (% of population)*. Abgerufen am 25. 05 2020 von <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>
- The World Bank Group Energy Unit, E. T. (2006). *Technical and economic assessment of off-grid, mini-grid and grid electrification technologies*. World Bank Group.
- United Nations. (2016). *Sustainable Development Knowledge Platform*. Abgerufen am 28. Februar 2020 von <https://sustainabledevelopment.un.org/>
- Uniyal, V., Kanojia, N., & Pandey, K. (Dezember 2016). Design of 5kw Pico Hydro Power Plant Using Turgo Turbine. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, S. 363-367.
- Vicente, S., & Bludszuweit, H. (2012). Flexible design of a pico-hydropower system for Laos communities . *Renewable Energy: An International Journal*, S. 406 - 413.
- Williams, A. A., & Simpson, R. (22. Januar 2009). Pico hydro – Reducing technical risks for rural electrification. *Renewable Energy: An International Journal*, S. 1986 - 1991.
- Williams, A., & Porter, S. (2006). Comparison of hydropower options for developing countries with regard to the environmental, social and economic aspects. Washington DC, USA: International Conference on Renewable Energy for Developing Countries.
- Williamson, S. J., Lubitz, W. D., Williams, A. A., Booker, J. D., & Butchers, J. P. (2019). Challenges Facing the Implementation of Pico-Hydropower Technologies. *J Sustain Res.* 2020;2(1):e200003.
- Zahnd, A., Stambaugh, M., Jackson, D., Gross, T., Hugl, C., Sturdivant, R., . . . Sharma, S. (2018). Modular Pico-hydropower System for Remote Himalayan Villages. In *Transition Towards 100% Renewable Energy* (S. 491 - 499). Springer International Publishing.
- Zainuddin, H., Yahaya, M. S., Lazi, J. M., Basar, M. F., & Ibrahim, Z. (2019). Design and Development of Pico-hydro Generation System for Energy Storage Using Consuming Water Distributed to Houses. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, S. 1928-1933.
- Zeiselmaier, A., Konz, A., & Rapp, C. (2013). Kleinstwasserkraft zur elektrischen Versorgung eines Dorfes im Regenwald Ecuadors. In *Wasserkraftprojekte*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
-

10. Anhang

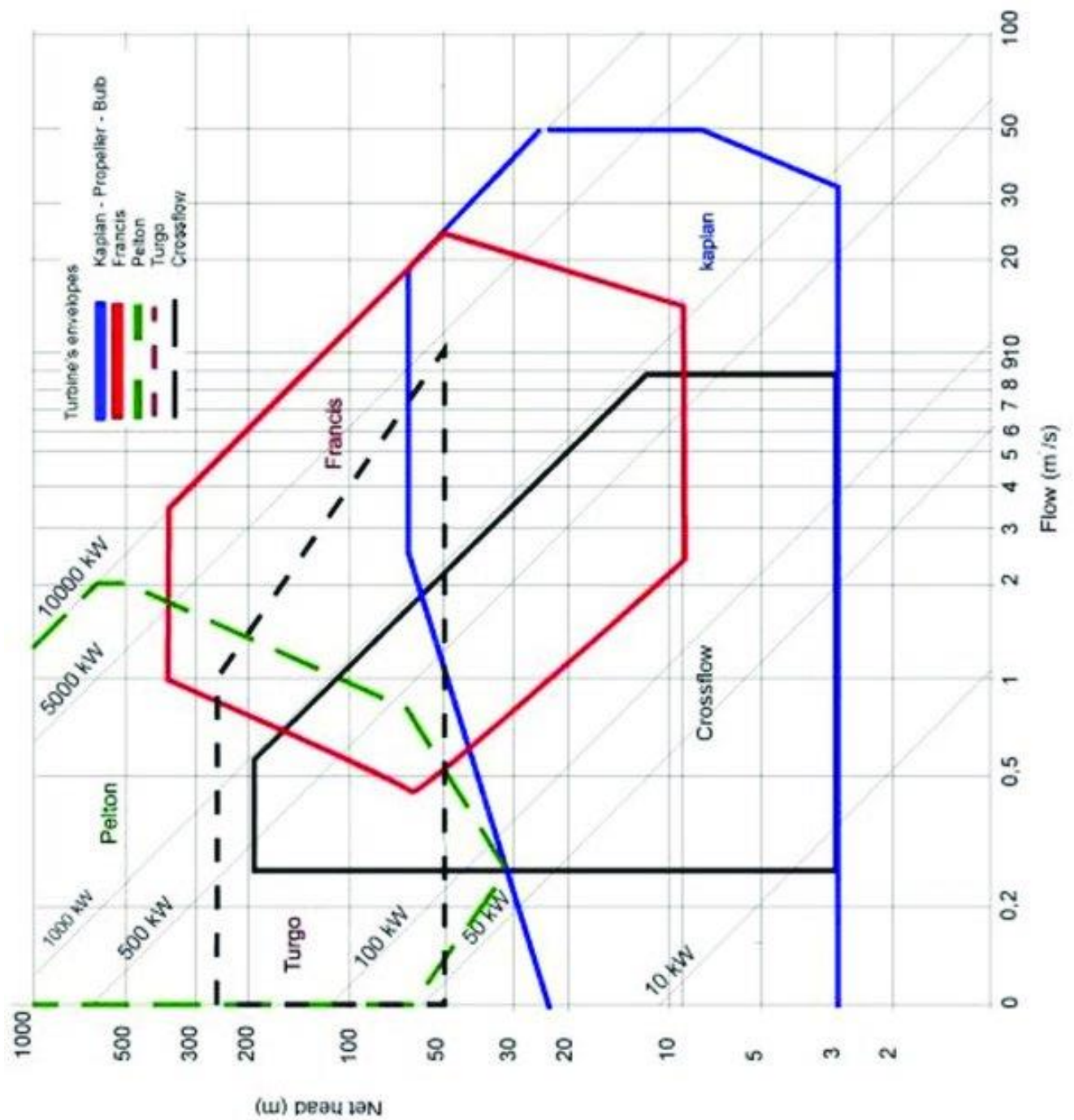


Abbildung 10-1: Tabelle zur Turbinenwahl basierend auf Fallhöhe und Durchfluss (Fraenkel, et al., 1991)

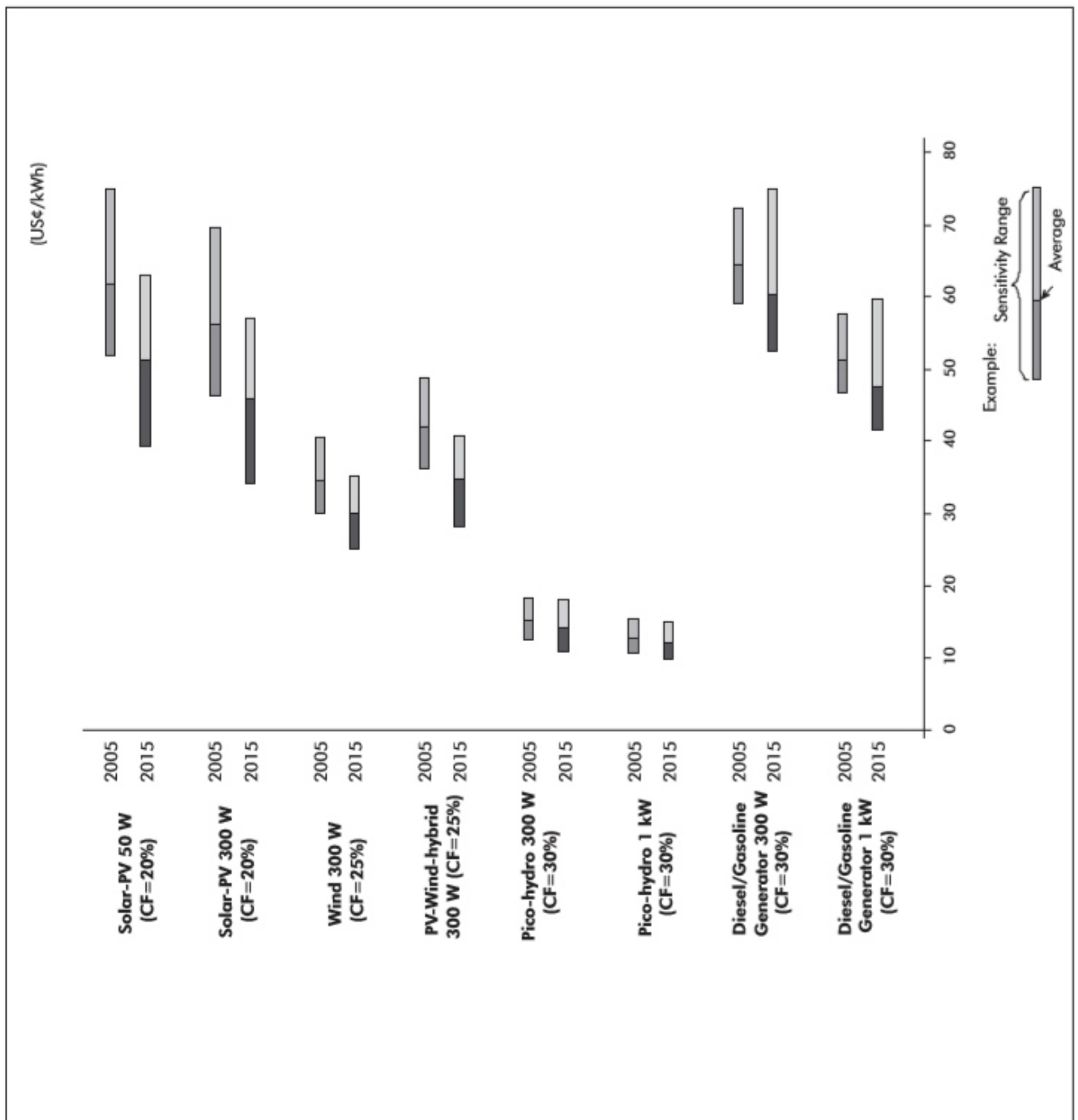


Abbildung 10-2: Stromgestehungskosten für netzunabhängige Energieträger (ESMAP, 2007)

Eidesstattliche Erklärung

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Marvin Alexander Priester, die vorliegende Bachelor-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Datum / Date:

02.06.2020

Unterschrift/Signature:

